

OPTIMIERUNG DES TABAKTROCKNUNGSPROZESSES
HINSICHTLICH DER
NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN SOLARER STRAHLUNG

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der Abteilung für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

JOACHIM MORHENNE
Schwelm

Bochum 1987

OPTIMIERUNG DES TABAKTROCKNUNGSPROZESSES

HINSICHTLICH DER

NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN SOLARER STRAHLUNG

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der Abteilung für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

JOACHIM MORHENNE

Schwelm

Bochum 1987

Dissertation eingereicht: 14. Januar 1987
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Februar 1987
Referent: Prof. Dr.-Ing. M. Fiebig
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1982 bis 1986 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermo- und Fluidodynamik der Ruhr-Universität Bochum.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Fiebig für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz für die Übernahme des Korreferates aussprechen.

Mein Dank gilt auch der Projektleitung Energieforschung PBE in der Kernforschungsanlage Jülich für die Förderung dieses Projektes.

Nicht vergessen möchte ich schließlich die Mitarbeiter des Instituts und die Studenten, die zur Lösung der Probleme beitrugen.

Bochum, im April 1987

INHALT

	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Optimierungskriterien für den Trocknungs- prozeß von Tabak	4
3. Der Tabaktrocknungsprozeß	7
3.1 Beschreibung der üblichen Trocknungs- verfahren von Tabak	7
3.2 Trocknungstechnisch relevante Größen des Tabaks	9
3.2.1 Wassergehalt	9
3.2.2 Trockengewichtsverluste	10
3.2.3 Strukturveränderungen	10
3.3 Biochemische Reaktionen während der Trocknung	11
3.4 Qualitätskriterien für getrockneten Virginia Tabak	13
3.5 Energiebedarf der konventionellen Tabaktrocknung	14
4. Optimierungsgrundlagen.....	17
4.1 Grundlegende Überlegungen zu einer Optimierung des Trocknungsprozesses	17
4.2 Die Wirkungsgradcharakteristik von Solar- kollektoren und deren Verlauf als beein- flussende Größe der Prozeßoptimierung	21

	<u>Seite</u>
5. Experimentelle Untersuchung des Einflusses ge- änderter Prozeßparameter auf die Qualität und den Trocknungsverlauf von Tabak	24
5.1 Ziel der experimentellen Untersuchungen	24
5.2 Beschreibung der Versuchsanlage	26
5.3 Durchführung der Meßreihen	28
5.4 Ergebnisse der Trocknungsversuche	30
5.4.1 Beeinflussung der Qualität während der Vergilbung	30
5.4.2 Einfluß der Prozeßführung auf die Farbfixierung und die Blatttrocknung	35
5.4.2.1 Einfluß des Anfangswassergehaltes	36
5.4.2.2 Einfluß des Temperaturniveaus und der Trocknungsgeschwindigkeit	36
5.4.3 Einfluß der Prozeßführung auf die Rippentrocknung	42
5.4.3.1 Bestimmung der maximalen Trock- nungstemperatur	42
5.4.3.2 Bestimmung von Sorptions- isothermen	43
6. Mathematisch physikalische Beschreibung des Trocknungsverlaufes	44
6.1 Beschreibung der Wärme- und Stoffübergangs- vorgänge	44
6.2 Modellierung des Wärme- und Stoffüberganges	47

	<u>Seite</u>
6.2.1 Beschreibung des Wärme- und Stoffüberganges durch Widerstände	47
6.2.2 Diskussion des Wärme- und Stoffübergangsmodelles	48
6.3 Modifikation des Wärme- und Stoffübergangsmodells durch Berücksichtigung pflanzenspezifischer Größen	50
6.3.1 Beeinflussung des Stoffüberganges durch die Reife des Tabaks	50
6.3.2 Berücksichtigung des Blattstandes und des Trockengewichtes als Teilwiderstände	52
6.3.3 Beeinflussung des Stoffüberganges durch die Prozeßtemperatur	54
6.3.4 Darstellung des Gesamtwiderstandes unter Berücksichtigung der Teilwiderstände	55
6.3.5 Analyse des äußeren Stoffübergangswiderstandes	56
7. Rechnerische Beschreibung des Trocknungsverlaufes	57
7.1 Modellkonzept	57
7.2 Computermodell- und Programmbeschreibung	58
7.2.1 Parameterdarstellung und Einschränkung	58
7.2.2 Vorgehensweise und Programmablauf	59
7.2.2.1 Programmteil Trockner und Trocknungsverlauf	60
7.2.2.2 Programmteil Qualitätsüberprüfung	61
7.2.2.3 Programmteil solarer Lufterhitzer	64

	<u>Seite</u>
7.3 Verifizierung des Simulationsprogramms	
Validation	66
7.3.1 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Meßwerten - Vertrauenstest	66
7.3.2 Beeinflussung der Rechnungen durch den Massenstrom im Trockner	67
7.3.3 Diskussion der Verifizierungsrechnungen	68
7.4 Einfluß geänderter Trocknungsparameter auf den Energieverbrauch	69
7.4.1 Der Einfluß des Eintrittszustandes der Luft auf den Energieverbrauch der ver- schiedenen Trocknungsphasen	69
7.4.2 Konsequenzen für die Prozeßoptimierung	74
8. Veränderung des Trocknungsprozesses zur Optimierung der Solarenergienutzung	76
8.1 Optimierungsvoraussetzungen	76
8.2 Optimierung des Gesamtzyklusses	77
8.3 Beeinflussung der Optimierung durch die Kollektoranlage	81
8.3.1 Bestimmung der optimalen Kollektorfeld- größe	81

	<u>Seite</u>
8.3.2 Auswirkungen der Kollektorfeldgröße und der Wirkungsgradcharakteristik auf die Prozeßoptimierung	82
8.4 Beeinflussung der Prozeßoptimierung auf den Aufbau und den Betrieb einer solaren Trocknungsanlage	85
9. Zusammenfassung.....	86
10. Literatur.....	89
Anhang.....	97

Verwendete Formelzeichen

	<u>Einheit</u>	
A	m^2	Fläche
a	m^2/kg	Fläche pro kg-Trockengewicht
c	kJ/kgK	Wärmekapazität
D ^p	m^2/s	Diffusionskoeffizient
D	m	Durchmesser
d	m	Dicke
F		Kollektorwirkungsgradfaktor
G	W/m^2	Globalstrahlung
h	kJ/kg	Enthalpie
Δh	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie
k ^v	$J/(sm^2 K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
K		Faktor
L		Leckfaktor
M	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
P	Pa	Druck
$\dot{q}$	kJ/sm^2	spez. Wärmestrom
$\dot{Q}$	kJ/s	Wärmestrom
r	kJ/kg	Bindungsenthalpie
R		Geometriefaktor
R	$kJ/(kgK)$	spezifische Gaskonstante
S	m	Länge
SF		Solare Deckungsrate
t	s (h)	Zeit
T	K (°C)	Temperatur
W	kg/ms	Stoffübergangswiderstand
x	kg/kg	Wassergehalt der Luft
X	kg/kg	Wassergehalt (dry b)
Y	kg/kg	Wassergehalt (wet b)

Griechische Buchstaben

α		Absorptionsverhältnis
α_F	$W/(m^2 K)$	Wärmeübergangskoeffizient
β_F	m/s	Stoffübergangskoeffizient
Δ		Differenz
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
μ	$kg/kmol$	Molmasse
η		Wirkungsgrad
Ω	kg/ms	Widerstand
ρ	kg/m^3	Dichte
φ		relative Luftfeuchtigkeit
τ		Transmissionsverhältnis
ϑ	K	Temperatur

Indices

A	aus, Austritt
A _m	Absorber (mittel)
Aus	Austausch
a	außen, Austausch
B	Bindungs-
b	Bad-
Bed	Bedarf
Blst	Blattstand
D	Dampf
Diff	Differenz
E,e	ein, Eintritt
F	Fluid
F _m	Fluid (mittel)
ges	gesamt
H	Himmel (diffus)
i	innen
ist	Istwert
L	Luft, Leck
k	kritisch
K	Kollektor
konv	konvektiv
korrr	korrigiert
m	mittel, Mischung
Max	maximal
mess	gemessen
Min	minimal
N	Nutz
O	Oberfläche
P	Partial
R	rückgeführt
Reife	Reife
S	Sättigung
s	Strahlung, Stoff
spez	spezifisch
soll	Sollwert
T	Tabak

t	zeitlich, Transmission
temp	Temperatur
trans	Transmission
t	Vergilbungszeit
^v tr	trocken
U, Um	Umgebung
v	Verlust
W	Wasser
w	Wärme-
zu	zugeführt
1+x	feuchte Luft
0	Ausgangs-

1. Einleitung und Problemstellung

Die Trocknung botanischer Güter ist im wesentlichen ein Prozeß, der der Erhaltung und Konservierung dieser Produkte dient. Dies trifft beim Tabak nur bedingt zu, da es in diesem Fall nicht nur darum geht, das Produkt lager- und verarbeitungsfähig zu machen, sondern es durch bestimmte biochemische Prozesse zu verändern, d.h. dem Tabak sein Aroma zu geben. Durch den Trocknungsverlauf wird der Ablauf und die Art der während der Trocknung notwendigen chemischen Reaktionen maßgeblich beeinflußt und gesteuert. Das Aroma des Tabaks steht damit in direktem Zusammenhang mit der Trocknungsdurchführung.

Durch geändertes Konsumverhalten wurden in der jüngsten Vergangenheit andere Tabaksorten und vollkommen andere Trocknungsverfahren notwendig. Waren früher die dunklen Tabake mit hohem Nikotin- und Kondensatgehalt bevorzugt, die bei Umgebungsbedingungen in speziellen Trocknungshäusern getrocknet wurden, so werden heute helle, sogenannte leichte Tabake verlangt.

Dieser helle Tabak, in den meisten Fällen handelt es sich um Tabak vom Typ Virginia (*Nicotiana Tabaccum* L), hat in den letzten Jahren starke Zuwachsraten in der weltweiten Produktion erzielt /1/. Es handelt sich dabei um einen Tabak von im getrockneten Zustand hellgelber bis orangegeblicher Farbe mit hohem Zuckergehalt, der zur Erzielung seines arteigenen Aromas einem besonderen Konditionierungsverfahren, der sogenannten Heißlufttrocknung, ausgesetzt werden muß.

Bei dieser Art der Trocknung wird der Tabak in speziellen, beheizten Trocknungshäusern einer in Abhängigkeit vom Trocknungsverlauf vorgegebenen Lufttemperatur und -feuchte ausgesetzt, um die sehr komplexen chemischen Reaktionen zu ermöglichen. Dieses Trocknungsverfahren, welches auch als flue-curing bezeichnet wird, ist ein Prozeß, der von den Tabakpflanzern empirisch gefunden wurde und der sich an den vom

Markt abhängigen Qualitätsnormen bzw. dem Konsumverhalten der Verbraucher im Laufe der Zeit entwickelte. Jedoch ist diese Art der Trocknung sehr energieintensiv. Allein in den USA, dem nach der VR China weltweit zweitgrößten Produzenten von Tabak, werden jährlich $1/3$ der gesamten zur Erntetrocknung erforderlichen Energiemenge für die Trocknung von Tabak aufgewendet /2/. Weltweit wurden 1983 3 Millionen Tonnen Virginia-Tabak produziert /3/, wofür bei den üblichen Trocknungsverfahren ein Energieäquivalent von 3,5 Millionen Tonnen Heizöl aufgewendet werden mußte.

Mit der starken Verteuerung in den siebziger Jahren und der drohenden Verknappung fossiler Energieträger wurde es auch auf diesem Gebiet notwendig, energiesparende Maßnahmen anzuwenden. Dies wurde in den industrialisierten Ländern durch Isolation der Trocknungshäuser und mit verbesserten Lüfterhitzern (Feuerungen und Wärmeübertragungsapparaten) realisiert. Untersuchungen zur Veränderung des Trocknungsprozesses mit dem Ziel, diesen energetisch günstiger durchzuführen, unterblieben jedoch. Es gilt also, ein traditionelles Trocknungsverfahren, welches zum Teil in modernen Trocknern durchgeführt wird, zu analysieren, um einmal über Veränderungen des Prozesses zu weiteren Verringerungen des Energieverbrauches zu kommen, zum anderen aber auch die bisherigen fossilen Energieträger durch regenerative Energiequellen zu ersetzen. Die Nutzung regenerativer Energiequellen wird in dieser Arbeit auf die thermische Nutzung der solaren Strahlungsenergie für den Anwendungsfall der Tabaktrocknung beschränkt. Die thermische Nutzung solarer Strahlung ist mittlerweile auch Stand der Technik und wird in dieser Arbeit selbst nicht weiter untersucht. Ziel dieser Arbeit ist es, den Trocknungsprozeß mit seinen Einflußgrößen auf die qualitätsbestimmenden Faktoren sowohl hinsichtlich einer energetisch günstigeren Prozeßführung als auch auf die Anwendungsmöglichkeiten der thermischen Nutzung solarer Strahlungsenergie hin zu untersuchen. Das heißt konkret, die Untersuchungen sollen Aufschluß darüber geben, inwieweit der Trocknungsprozeß den Erfordernissen der thermischen Solarenergienutzung angepaßt

werden kann, so daß die Produktqualität nicht verändert wird, d.h. noch den Qualitätsanforderungen des Marktes genügt.

Gerade bei Entwicklungsländern /4/, deren volkswirtschaftliche Entwicklung maßgeblich vom Export landwirtschaftlicher Produkte abhängig ist, zu denen häufig auch Tabak gehört, zeigt sich die Notwendigkeit der Anwendung von energieeinsparenden Maßnahmen und die Substitution von fossilen Energieträgern. Entwicklungsländer besitzen oft weder fossile Energievorräte oder können sie nicht erschließen, noch haben sie Devisen für deren Import, um die sehr energieintensive Erntetrocknung durchführen zu können. Dies führt zu Raubbau an den vorhandenen Waldbeständen. Die Folge sind sehr akut werdende ökologische Probleme /5/, die gerade in den Ländern auftreten, die günstige geographische Voraussetzung für die Solarenergienutzung besitzen (siehe dazu eine Karte der Tabakanbaugebiete /6/ im Anhang A1).

2. Optimierungskriterien für den Trocknungsprozeß von Tabak

Wie bereits in der Einleitung angesprochen, läßt sich der Trocknungsprozeß unter zwei völlig unterschiedlichen Gesichtspunkten betrachten:

1. als der technische Vorgang des Trocknens, also die Ermittlung der Stoffübergangsbeziehungen und der zum Entzug des Wassers notwendigen Energiemenge
2. als ein Prozeß zur Erzeugung eines Produktes mit bestimmten Inhaltsstoffen und Aussehen, also die Herstellung einer bestimmten Qualität

Diese Aspekte sind natürlich nicht als unabhängige Vorgänge zu sehen, vielmehr stellt sich die Produktqualität als eine vom Trocknungsprozeß abhängige Größe dar. Eine Prozeßoptimierung muß demzufolge sowohl die erzeugte Produktqualität als auch den Trocknungsvorgang berücksichtigen. Als Optimierungskriterium, das beide Aspekte berücksichtigt, bietet sich eigentlich nur eine ökonomische Beurteilung an. Indem einmal der Verkaufserlös als ein Maß für die Produktqualität gewertet wird und zum anderen der Energieverbrauch bzw. die Kosten¹ zur Erzeugung dieser Qualität dazu in Relation gesetzt werden.

Eine Bestimmung der Qualität über den erzielten Verkaufspreis hat zudem den Vorteil, daß sich ändernde Anforderungen, hervorgerufen durch geändertes Konsumverhalten der Verbraucher, sofort mitberücksichtigt werden. Es ist zudem ein häufig praktiziertes Verfahren /7/, welches aber noch die sogenannten "Kräfte des Marktes" beinhaltet.

¹ Neben dieser ökonomischen Bewertung sind natürlich auch andere Kriterien denkbar, etwa volkswirtschaftliche oder ökologische, die wegen ihrer Komplexität und begrenzten Gültigkeit hier keine Berücksichtigung finden.

Der Verkaufspreis kann damit nur Anhaltspunkte für eine bestimmte Qualität liefern. Im europäischen Raum ist er zudem nur mit Einschränkungen verwendbar, da hier aufgrund der üblichen Anbau- und Lieferverträge die Produktqualität keine stetige Funktion darstellt (siehe Kap.3.4). Die Bewertung erfolgt in drei Abstufungen, die jedoch im Preisniveau erhebliche Unterschiede aufweisen. Die erste Qualitätsstufe erzielt demnach 100% des maximalen Preises, die zweite jedoch nur noch 57% und für die dritte werden gerade noch 22% des maximalen Preises gezahlt. Eine Kalkulation mit minderen Qualitäten ist demzufolge unrealistisch, da der Verlust aufgrund der niedrigeren Qualität nicht durch eine Verringerung der Trocknungskosten kompensiert werden kann (der Anteil der Trocknungskosten an den Gestehungskosten liegt weit unter 50%). Daraus folgt, daß eine Optimierung des Tabaktrocknungsprozesses nur in dem Bereich durchgeführt werden kann, in dem die Produktqualität nicht beeinflußt wird, das heißt keine Abstufung erfolgt. In diesem Fall ist eine Optimierung hinsichtlich der Betriebskosten, was bei der Trocknung einer Minimierung der Energiekosten gleichzusetzen ist, sinnvoll. Im Falle der Nutzung von Solarenergie ist ein derartiges Kriterium jedoch sehr schwierig zu handhaben, da in diesem Fall auch die Amortisation für die erstellte Anlage mit einbezogen werden muß. Neben anlagenspezifischen Größen müssen dabei auch Handhabung der Anlage, Nutzungsdauer, Preisentwicklung anderer Energieträger und steuerliche Vorteile einbezogen werden, also Größen, die nur sehr schwer vorhergesehen werden können. Als Beispiel für derartige Berechnungen hat Bolst /8/ für eine bestehende Anlage je nach Nutzungsdauer und berechneter Solarer Deckungsrate (zum Begriff der Solaren Deckungsrate siehe /9/) Abweichungen zwischen den Amortisationszeiten bis zu einem Faktor 30 ermittelt.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit als Kriterium zur Beurteilung des Trocknungsprozesses der Verbrauch an konventionellen Energieträgern herangezogen. Dieses Kriterium ist für einen konventionell beheizten Trockner identisch mit ökonomischen Optimierungskriterien (Minimierung des Energie-

verbrauches bzw. der Betriebskosten). Für den Fall der solarunterstützten Trocknungsanlage wird in Abhängigkeit der Prozeßführung der durch das Solarsystem abdeckbare Energieanteil und der zusätzlich erforderliche konventionelle Energieanteil ermittelt. Mit der Kenntnis dieser Werte ist es möglich, in der Planungsphase einer solarunterstützten Trocknungsanlage je nach Kosten der Anlage und den Kosten für andere Energieträger sowie der Kenntnis der Nutzungsdauer und der eingestrahlten Energie ein Optimum zu errechnen. Bei bestehenden Anlagen können durch Veränderungen in der Prozeßführung die zusätzlich erforderlichen Energiemengen reduziert werden.

3. Der Tabaktrocknungsprozeß

Eine ausführliche Darstellung der für den Trocknungsprozeß relevanten Größen sei hier auf die Trocknungsverfahren, die trocknungstechnisch wichtigen Größen wie Wassergehalt, Trockengewicht und Trockengewichts- und Strukturänderungen sowie den Energiebedarf beschränkt. Eine kurze Darstellung und Literaturhinweise über Tabak, Tabakernteverfahren soweit sie den Trocknungsprozeß betreffen bzw. beeinflussen, Tabakinhaltsstoffe und deren Veränderungen sowie biochemischer Vorgänge während der Trocknung ist dem Anhang A2- A5 zu entnehmen.

3.1 Beschreibung der üblichen Trocknungsverfahren von Tabak

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen bildete der von der Landesanstalt für Tabakforschung Rheinstetten (Forchheim) veröffentlichte Prozeß /10/, der als Vergleichsprozeß herangezogen wurde und im weiteren auch als Standardprozeß bezeichnet wird. Abbildung 3.1 zeigt die darin vorgegebenen Prozeßvorgaben für Lufttemperatur und -feuchtigkeit.

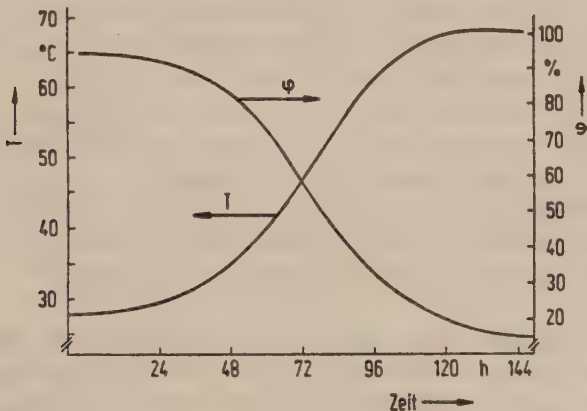


Abb.3.1: Prozeßführung der Heißlufttrocknung von Tabak nach /10/;
zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und -feuchtigkeit

Zum Teil stark abweichende Verläufe für den gleichen Prozeß zeigen die folgenden Veröffentlichungen /11/, /12/, /13/, dargestellt in Abbildung 3.2.

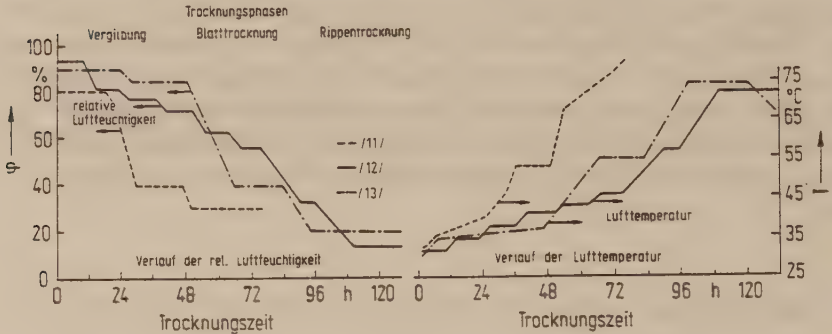


Abb. 3.2: Weitere veröffentlichte Prozeßvorgaben für heißluftgetrocknete Tabake nach Maltry et al /11/, Saravia et al /12/ und Jaffre /13/; zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur und -feuchte

Die starken Abweichungen bei sonst relativ präzisen Angaben sind umso erstaunlicher, da es sich bei diesen Angaben um experimentell ermittelte Optimalwerte handeln soll. Nach den gemachten Erfahrungen sind für diese Abweichungen unterschiedliche Trocknertypen mit unterschiedlichen Meßorten für Temperatur und Feuchtigkeit der Trocknungsluft sowie voneinander abweichende Massenströme und unterschiedliche Erntepraktiken verantwortlich. In Betracht zu ziehen sind ebenfalls Unterschiede in den verwendeten Tabaksorten.

Diese Abweichungen der jeweiligen Standardprozesse voneinander legen außerdem den Schluß nahe, daß Modifikationen des Prozesses nicht nur möglich, sondern unter bestimmten Voraussetzungen sogar notwendig sind, um einen Ausgleich für bestimmte Randbedingungen, wie oben genannt, zu schaffen.

3.2 Trocknungstechnisch relevante Größen des Tabaks

Eine Übersicht über die wichtigsten Größen gibt Tabelle 3.1:

Trockengewicht ¹		1.Blatt	12 %
		16.-18.Blatt	22 %
Blattgröße und spezifisches Gewicht		Länge * Breite	spez.Gewicht
	untere Erntestufe	0,57 * 0,33 →	0,51 kg/m ²
	mittlere Erntestufe	0,63 * 0,33 →	0,54 kg/m ²
	obere Erntestufe	0,62 * 0,26 →	0,56 kg/m ²
Gewichtsverteilung ¹		Rippe: 39 %, Lamina: 61 %	
Blattdichte ²		$\rho = 480,6 + 320,4 * Y$ kg/m ³	
Fläche ²		$A = 10^{-4} * (22,58 + 8,39 * Y)$ m ²	
Dicke ²		$d = 10^{-3} * (0,112 + 0,263 * Y)$ m	
¹ nach Chang /14/, ² nach Nordenskjöld /15/			

Taballe 3.1: Trocknungstechnisch relevante Größen von Tabak

In obiger Tabelle wird deutlich, daß Nordenskjöld /15/ nicht zwischen verschiedenen Blattständen bzw. Erntestufen unterscheidet und somit die angegebenen Gleichungen nur Anhaltswerte bzw. Abhängigkeiten aufzeigen können.

3.2.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt des erntefrischen Virginia-Tabaks liegt zwischen 78 und 92 %. Die höheren Werte sind dabei den ersten Erntestufen, also den unteren Blättern, die niedrigen Wassergehalte entsprechend den späteren Erntestufen zugeordnet (zur Ernte und den Erntestufen siehe Anhang A3, A4). Die Gewichts- bzw. Wasserverteilung innerhalb des Blattes zwischen Blatttissue und den Rippen ergibt nach Akehurst /1/, siehe auch Nordenskjöld /15/, Unterschiede bis zu 1000 %, so daß eine Aussage darüber Sorte, Standort und Wachstumsbedingungen beinhalten muß.

Der zeitliche Wasserverlust während der Trocknung ist aber nicht nur von der Trocknungsdurchführung, also den gewählten Luftzuständen abhängig, sondern auch von der Reife der Blätter /16/. So sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit mit der Unreife der Blätter. Dies ist auch durch die durchgeführten Versuche (siehe dazu auch Kap.5) nachgewiesen.

3.2.2 Trockengewichtsverluste

Durch die ablaufenden chemischen Reaktionen während der Trocknung verliert das Blatt etwa 12 - 16 % des ursprünglichen Trockengewichtes. Dies ist hauptsächlich auf Veratmungsvorgänge während der Vergilbung zurückzuführen (54% des gesamten Verlustes). Jedoch auch in der sich anschließenden Blatt- und Rippentrocknung gehen jeweils nochmals 29 % bzw. 17 % verloren /17/.

3.2.3 Strukturveränderungen

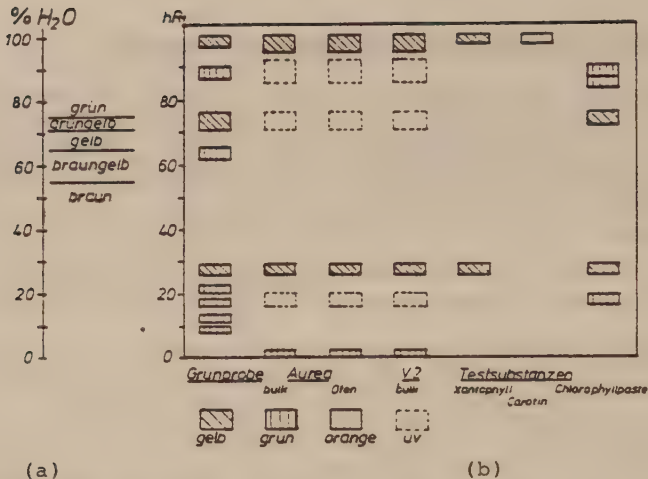
Das getrocknete Blatt rollt sich ein und weist im Vergleich zum grünen Blatt auch eine verkleinerte Oberfläche auf. Die Schrumpfung beträgt bis zu 52 % /18/; ein derartig hoher Wert konnte durch eigene Messungen jedoch nicht bestätigt werden (< 30 %).

3.3 Biochemische Reaktionen während der Trocknung

Aufgrund der ablaufenden chemischen Reaktionen, die sich äußerlich in einer Farbänderung widerspiegeln, wird dieser Prozeß in der englisch- und italienischsprachigen Literatur auch nicht als Trocknungsprozeß, sondern als Konditionierungsprozeß, "curing" im Englischen bzw. "curare" im Italienischen, bezeichnet (wenn hier weiterhin von Trocknungsprozeß gesprochen wird, so beinhaltet der Begriff diesen Vorgang).

Der physiologische Prozeß, der während dieser Konditionierung abläuft, wird auch als künstliche Seneszenz bezeichnet; als künstlich deshalb, da wegen der abgeschnittenen Versorgung von der Pflanze Vorgänge ablaufen, die mit der natürlichen Seneszenz nicht identisch sind aber durch den Trocknungsprozeß beeinflusbar sind. Trotzdem muß das Tabakblatt, zumindest in der Anfangsphase als noch lebendes Pflanzenteil betrachtet werden /19/. Die während dieser Zeit ablaufenden Reaktionen und Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung beruhen hauptsächlich auf einer Vielzahl von enzymatischen Reaktionen, die unter anderem eine Farbänderung bewirken. Die Farbe eines grünen Blattes setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Farbstoffe zusammen, der Gruppe der grünen Farbstoffe, wozu die Chlorophylle, Xanthophylle und Phäophytine zu rechnen sind, und der Gruppe der gelben bis roten Farbstoffe, bei welchen es sich um Carotin bzw. carotinähnliche Farbstoffe handelt. Der Ablauf bzw. die Aktivität der Enzyme, die die grünen Farbstoffe weitgehend abbauen, ist zum einen über die Temperatur, zum anderen aber auch durch den Wassergehalt bzw. dessen Reduktion während der Trocknung beeinflusbar /20/. Die folgende Abbildung zeigt Farbveränderungen, hervorgerufen durch enzymatische Reaktionen während der Trocknung von Tabak (Lufttrocknung).

Verantwortlich für die Farbveränderungen von grün zu gelb ist der Chlorophyllabbau durch den Prozeß der Chlorophyllase /21/.



(a)

(b)

Abb. 3.3 a: Beziehung zwischen Farbe und Wassergehalt in trocknenden Tabakblättern /19/

Abb. 3.3 b: Dünnschichtchromatogramm der Blattfarbstoffe vor und nach dem Trocknungsverfahren /22/ für die Virginia Sorten V2 und Aurea (untersuchte Sorte)

Dieser Vorgang wird auch Vergilbungsphase genannt. Die gelben bzw. gelbroten Farbstoffe verändern sich dagegen nur unwesentlich, sie werden durch den Grünabbau nur sichtbar. Die sich anschließende Farbveränderung von gelb zu braun ist bei den heißluftgetrockneten Tabaken unerwünscht, es gilt vielmehr, die gelbe Färbung zu erhalten. Dies kann nur durch einen erhöhten Wasserentzug gewährleistet werden. Diese Farbfixierungsphase muß sicherstellen, daß keine Oxydation der Polyphenole eintreten kann. Wegmann und Kitzmann /19/ vermuten, daß die im Blatt enthaltenen Carotinoide hier einen Oxydationsschutz bilden könnten. Durch einen erhöhten Wasserverlust werden enzymatische Vorgänge wie die Lipoxygenase, die mit dem Abbau der Carotinmoleküle in Zusammenhang gebracht wird, unterdrückt, und die gelbe Färbung bleibt erhalten. Diese Vorgänge sind jedoch sehr komplex und in ihrer Wirkungsweise in der Mehrzahl unbekannt. Eine Übersicht über die Tabakinhaltsstoffe und deren Veränderung während der Trocknung gibt der Anhang A5.

3.4 Qualitätskriterien für getrockneten Virginia-Tabak

Die Qualität des getrockneten Tabaks wird in erster Linie vom Aussehen und seiner Struktur bestimmt. Beurteilungskriterium ist die Farbe¹, die orange-goldgelb bis leuchtend gelb bzw. gelb sein sollte. Die Blattfarbe sollte einheitlich sein; das Blatt unbeschädigt und geschmeidig und in seiner Struktur narbig. Die Blätter müssen glimmfähig sein (Güteklasse 1). Zur Klassifizierung und Preisgestaltung siehe /23/, /24/.

In die Güteklasse 2 fallen die Tabake, die von der Farbe her einen gelben Grundton mit gelbbraunen, gelbgrünen oder gelbgrauen Verfärbungen aufweisen; die Blätter dürfen leicht beschädigt (bis zu 1/4 der Blattfläche), müssen aber noch glimmfähig sein. In Güteklasse 3 fallen alle übrigen getrockneten Tabake, die nicht Klasse 1 oder 2 entsprechen.

Aufgrund der Beurteilung der erzeugten Tabakqualität - in erster Linie nach der Färbung - ist die Qualität maßgeblich von dem gewählten Trocknungsprozeß abhängig, da durch diesen die enzymatischen Vorgänge ermöglicht werden, die dem Tabak sein spezifisches Aussehen geben. Unter der Voraussetzung, daß die grünen Blätter die notwendigen Inhaltsstoffe besitzen, kommt damit der Trocknung für die Produktqualität eine maßgebliche Rolle zu.

¹

Wie beim Wein deutet sich auch beim Tabak ein Umbruch an, der die sensorische Prüfung durch chemische Analysen ersetzt (s. a. Kap. 5.4.2.2).

3.5 Energiebedarf der konventionellen Tabaktrocknung

Der Energiebedarf eines Trocknungsprozesses läßt sich relativ leicht abschätzen, wenn die Menge des zu verdampfenden Stoffes im Trockengut und dessen Verdampfungsenthalpie bekannt sind, wobei kapazitive Effekte zumeist wegen der weitaus höheren Verdampfungsenthalpie vernachlässigbar sind:

$$Q_{\text{Min}} = m_w \cdot \Delta h_v \quad (3.1)$$

$m_w \cdot \Delta h_v$ ist auch der minimale Energiebedarf eines Trocknungsprozesses, so daß sich die Prozeßführung mit diesem Wert leicht beurteilen läßt:

$$\eta = Q_{\text{Min}} / Q_{\text{Bed}} \quad (3.2)$$

Für den Tabaktrocknungsprozeß des bulk-curings beträgt diese Gütezahl η nach Orbeck /25/ 0,45 bei dem von ihm untersuchten Trockner.¹ Der um den Faktor 2,2 höhere Energiebedarf ist dort durch die Tatsache bedingt, daß aufgrund des vorgegebenen Trocknungsverlaufes erhebliche Luftmengen ausgetauscht werden müssen, die nicht gesättigt sind und auch ein Temperaturniveau besitzen, das über dem der angesaugten Frischluft liegt.

Abb.3.4 zeigt den Trocknungsverlauf im h,x-Diagramm für feuchte Luft (zur Anwendung des h,x-Diagrammes s. Kap.4.1).

¹ η wurde aus den von Orbeck /25/ ermittelten mittleren Energiebedarf für einen sechs Tage dauernden Trocknungszyklus von 0,92 l Heizöl und 0,9 kWh (≈ 36630 kJ) pro kg trockenen Tabak errechnet. Der Trockengewichtsanteil betrug 13,6 % entsprechend 6,35 kg H_2O im Frischgut ($\approx Q_{\text{Min}} = 15437$ kJ)

von -20 bis 100 °C und P = 1 bar

Richtpfeil

Blottrichtung

Vergütung

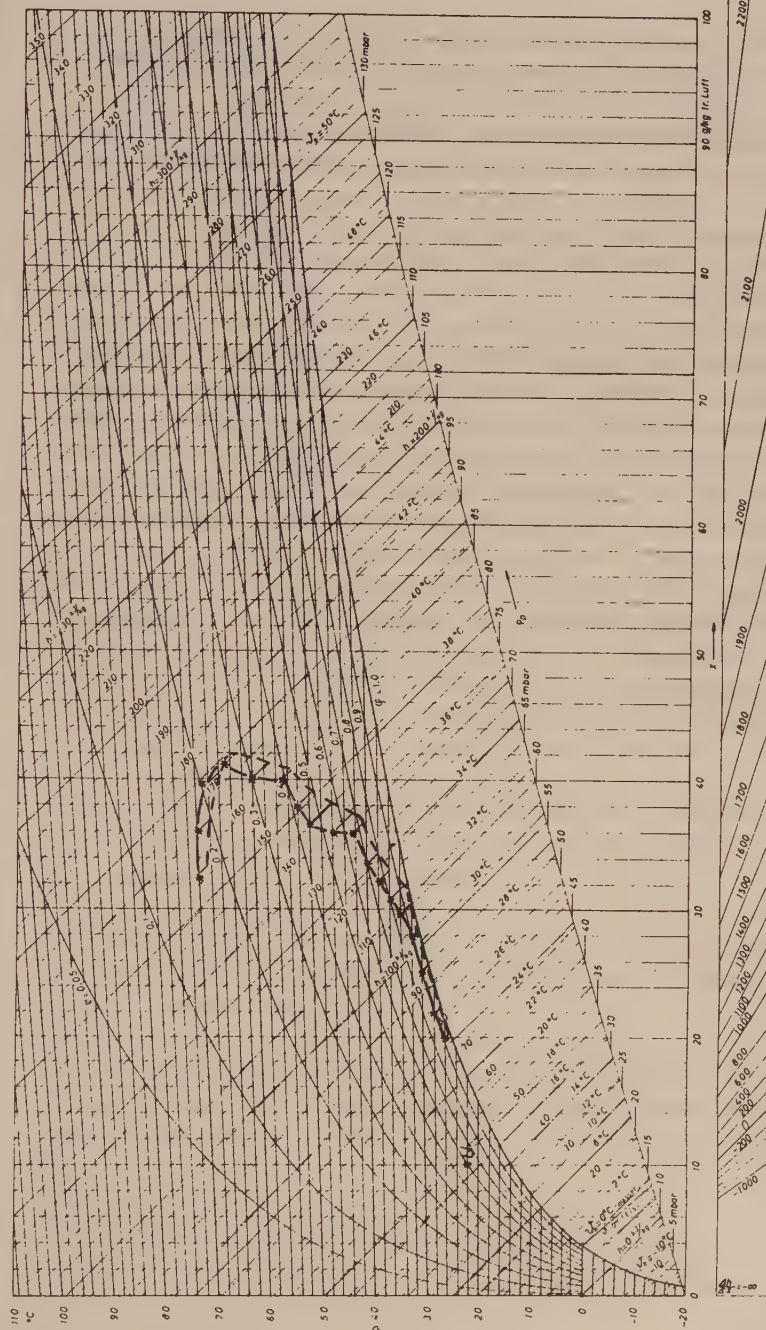


Abb. 3.4: h,x-Diagramm für feuchte Luft mit eingezeichnetem Prozess

Dargestellt ist die Zustandsänderung der Luft während des gesamten Zyklusses. Die ** symbolisieren den zeitlichen Verlauf der Eintrittszustände, die strichpunktierte Linie die der zugehörigen Austrittswerte. Der Prozeßverlauf zu einem Zeitpunkt t_i kann ermittelt werden, wenn, von einem gewünschten Eintrittswert isenthalpisch abgekühlt, der Austrittswert erreicht wird. Beispielhaft sind einige mögliche Zustandsänderungen eingezeichnet (ausgezogene Linie).

Aus Abbildung 3.4 ist ersichtlich, daß der Prozeß in den Anfangsstadien energetisch recht günstig verläuft, während in den weiteren Stadien der Blatt- und Rippentrocknung sehr viel Luft ungesättigt mit relativ hoher Temperatur den Trockner verläßt, was in hohen Luftaustauschraten begründet liegt. In diesen Stadien ist sowohl der Energie- als auch der Luftverbrauch sehr hoch. Ansatzpunkte für eine Prozeßoptimierung sind damit in der Blatt- und Rippentrocknung gegeben, da hier das weitaus größte Einsparungspotential besteht. Im Hinblick auf eine Solarenergienutzung ist jedoch auch das Vergilbungsstadium interessant, da es vom Temperaturniveau her günstige Voraussetzungen bietet (s.Kap.4.2).

4. Optimierungsgrundlagen

4.1 Grundlegende Überlegungen zu einer Optimierung des Trocknungsprozesses

Eine energetische Optimierung eines Trocknungsprozesses bedeutet, wie bereits in Kap.2 ausgeführt, die Minimierung des Energiedarfs. Werden primär die Kosten für die aufgewendeten Energiemengen betrachtet, so führt diese Überlegung konsequenterweise zur sogenannten Kaltlufttrocknung. Luft mit Umgebungszustand wird dabei über das Gut geführt und nimmt einen Teil der Feuchtigkeit des Gutes auf. Der Vorgang läuft isenthalpisch¹ ab, nur das Verhältnis von fühlbarer zur latenten Wärme der Luft verändert sich.

Daß dieser Prozeß so meistens nicht angewandt wird, liegt an den Erfordernissen des Trockengutes. Diese sind beim Tabak:

1. Es muß ein niedriger Endwassergehalt erreicht werden, der sich aufgrund von Sorptionsvorgängen bei Umgebungsbedingungen nicht einstellen kann (s. Kap. 5.4.3.2).
2. Die Trocknungsdauer ist aus qualitativen Gründen befristet. Diese ist nur über größere Trocknungsgeschwindigkeiten zu erzielen.
3. Der Trocknungsprozeß erfordert einen eng eingegrenzten Temperatur- und relativen Feuchteverlauf aus qualitativen Gründen.

Eine Erhöhung des Stofftransportes ist bei der Verdunstungstrocknung nur über eine Steigerung des Potentials, der Dampfdruckdifferenz zwischen der Trocknungsluft und dem

¹ Unter der Annahme, daß kapazitive Effekte vernachlässigbar sind.

Trocknungsgut, möglich. Diese wiederum ist bei konstanten Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten nur über eine Erhöhung der Temperatur bzw. Senkung der relativen Feuchte möglich. Da sich der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur ändert, ist eine Erhöhung der Temperatur bei nicht temperaturempfindlichen Gütern stets vorzuziehen. Dies läßt sich mit Hilfe eines h,x -Diagramms /26/,/27/,/28/ leicht nachweisen. Da sich der Energieverbrauch, wie er in diesem Diagramm dargestellt ist, nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta \dot{Q} = \dot{m}_L (h_A - h_U) \quad (4.1)$$

resultiert der Energiebedarf aus der Enthalpieerhöhung vom Umgebungsniveau zum Austrittszustand. Entsprechendes gilt für den Wasserentzug des Trockengutes, der sich wie folgt berechnet:

$$\Delta \dot{m}_W = \dot{m}_L (x_A - x_U) \quad (4.2)$$

Wird Energiegieverbrauch und Wasserentzug zueinander in Relation gesetzt, ergibt sich der spezifische Energiebedarf. Dieser ist identisch mit dem im h,x -Diagramm dargestellten Randmaßstab:

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{h_A - h_U}{x_A - x_U} \quad (4.3)$$

Als Beispiel sei in Abb. 4.1 ein Trocknungsvorgang im h,x -Diagramm dargestellt.

Da der spezifische Energieverbrauch nur von dem Ein- und Austrittszustand der Luft abhängig ist, wird der Prozeß um so günstiger, je weiter der Zustand (3) in Abb. 4.1 bei gleicher Temperatur zu höheren Wassergehalten hin verschoben wird. Im h,x -Diagramm bedeutet dies, daß die Steigung der Verbindungslinie von Zustand (1) und (3) flacher wird, was gleichbedeutend einem niedrigeren spezifischen Energieverbrauch ist. Weiterhin ist der Zustand (2) entscheidend für Zustand (3), da der Trocknungsprozeß meist fast isenthalpisch verläuft. Nur mit einer Erhöhung der Temperatur ist deshalb

bei der dargestellten Prozeßführung ein Verschieben von Zustand (3) zu höheren Wassergehalten hin möglich. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Durchführung von mehrstufigen Trocknungsprozessen (s. Abb. 4.2).

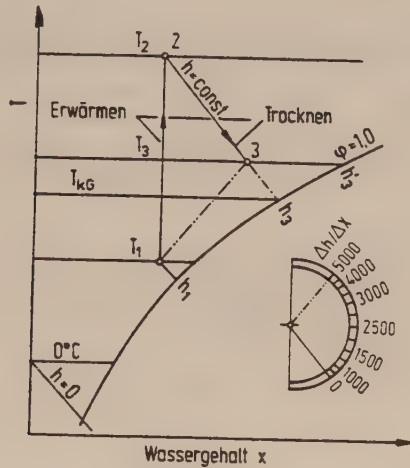


Abb. 4.1: Trocknungsvorgang, dargestellt im h, x -Diagramm

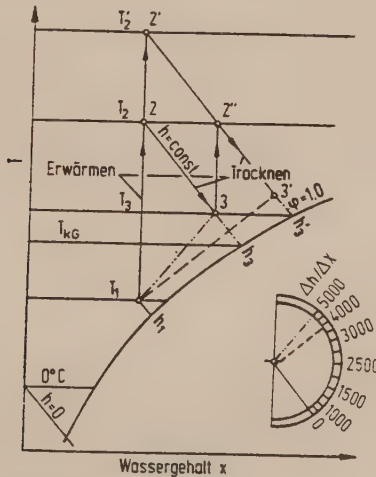


Abb. 4.2: Mehrstufiger Trocknungsprozeß, dargestellt im h, x -Diagramm

Zusammenfassend stellt sich ein energetisch günstiger Trocknungsprozeß wie folgt dar:

1. Die Austrittsfeuchtigkeit der Luft sollte so hoch wie möglich sein
2. Trocknen mit sehr hohen Temperaturen senkt den spezifischen Energieverbrauch (unter Berücksichtigung von Punkt (1)).

In diesen Überlegungen sind keinerlei Verluste wie Transmissionsverluste des Trockners oder Umwandlungsverluste bei der Wärmeerzeugung berücksichtigt.

4.2 Die Wirkungsgradcharakteristik von Solarkollektoren und deren Verlauf als beeinflussende Größe der Prozeßoptimierung

Die zur thermischen Nutzung der solaren Strahlungsenergie verwendeten flachen Kollektoren absorbieren die ungebündelt einfallende Strahlung und übertragen einen Teil auf ein Wärmeträgerfluid. Die Grundlagen über die Wirkungsweise der thermischen Nutzung solarer Strahlung mit Hilfe von Kollektoren ist Duffie und Beckman /29/, /30/ zu entnehmen. Bei flachen Solarkollektoren handelt es sich um nicht adiabate Strahlungswärmeaustauscher, deren Verluste von der Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektor und dessen Umgebung abhängig sind. Der Wirkungsgrad eines Solarkollektors wird als das Verhältnis des auf das Wärmeträgerfluid übertragenen Energiestromes zu der in dieser Zeiteinheit einfallenden Strahlungsenergie definiert.¹

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_N / A * dt}{\int G * dt} \quad (4.4)$$

Die auftretenden Verluste sind einerseits die der einfallenden Strahlung in etwa proportionalen sogenannten optischen Verluste, hervorgerufen durch unvollständige Absorption ($\alpha < 1$) und unvollständige Transmission der Abdeckungen ($\tau < 1$) und andererseits die Verluste durch Konvektion, Abstrahlung und Wärmeleitung, welche von der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und der Umgebung abhängig sind.

$$\dot{Q}_V = (1 - \tau\alpha) GA + kA (T_{Am} - T_U) \quad (4.5)$$

¹ Duffie und Beckman definieren G als die auf eine beliebige Fläche auftreffende Strahlung, die, mit einem geometrischen Faktor R multipliziert, die in den Kollektor einfallende Strahlung ergibt. Wenn hier von der Globalstrahlung G gesprochen wird, so sei dieser Term mit dem in Duffie/Beckman benutzten Term G*R identisch. Die ebenfalls getroffene Unterscheidung in direkte und diffuse bzw. Himmelstrahlung bezeichnet mit $G_S * R$ und $G_H * R_H$ seien in dieser Betrachtung vernachlässigt.

Wegen der für die Nutzung relevanten Fluidtemperatur des Wärmeträgers wird üblicherweise der Wirkungsgrad nicht auf die meist unbekannte Absorbtemperatur bezogen, sondern auf die mittlere Fluidtemperatur (arithmetisches Mittel zwischen Ein- und Austritt) /31/. Mit $\dot{Q}_N = G \cdot A - \dot{Q}_V$ in einem Zeitintervall bei stationären Bedingungen ergibt sich aus Gleichung 4.4 und 4.5 der Wirkungsgrad wie folgt:

$$\eta = F \cdot (\alpha - k \cdot \frac{(T_F - T_U)_m}{G}) \quad (4.6)$$

Der Faktor F, auch bezeichnet als Kollektorwirkungsgradfaktor ($F < 1$), ist das Verhältnis von real abgeführtem Energiestrom zu dem, der möglich wäre, wenn die Fluidtemperatur gleich der Absorbtemperatur wäre. F ist damit ein Maß für die Wärmeübertragung vom Absorber an das Fluid und den thermischen Widerstand vom Absorber an die Umgebung.

$$F = \alpha_F / (\alpha_F + k)$$

Neuere Arbeiten auf dem Gebiet der solaren Luftherhitzer /32/, /33/ haben sich insbesondere mit dem Problem der schlechten Wärmeübertragungseigenschaften der Luft und der mechanischen Druckverlustleistung beschäftigt und mit exergetischen Optimierungskriterien, dort als Optimierung hinsichtlich des Nettoexergiestromes definiert, Verbesserungen des Kollektorwirkungsgrades bei solaren Luftherhitzern erzielt. Die Wirkungsgrade und die Druckverluste der nach diesen Kriterien gefertigten Luftherhitzern sind denen von Kollektoren, die mit Wasser als Wärmeträgermedium betrieben werden, ebenbürtig. Den Wirkungsgradverlauf solcher Kollektoren zeigt Abbildung 4.3. Wenn dieser Kollektorwirkungsgradverlauf auch gegenüber handelsüblichen Kollektoren gute Verbesserungen bei geringeren Druckverlusten aufweist, so ist die wichtigste Forderung an den Anwender von Solarkollektoren immer noch, bei möglichst niedrigen Temperaturen zu arbeiten, um mit höherem Wirkungsgrad größere Energiegewinne zu erzielen, bzw. bei neu zu erstellenden Anlagen, die Kollektoranlage mit geringeren

Abmessungen erstellen zu können.

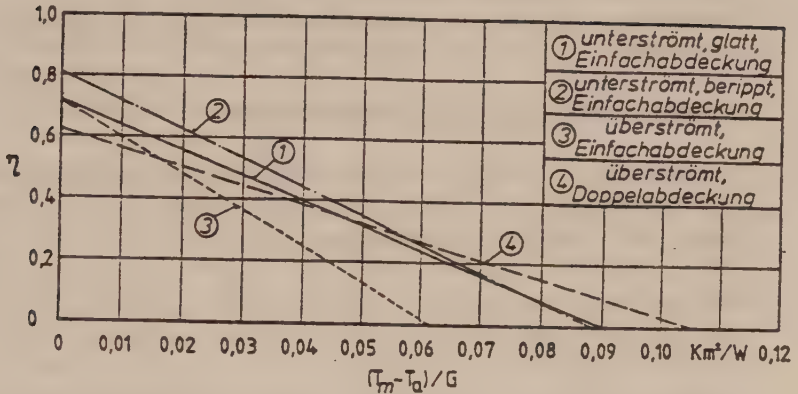


Abb. 4.3: Wirkungsgradverlauf solarer Lufterhitzer, aufgetragen nach ASHRAE /34/

Die Hauptanforderung an den Trocknungsprozeß von Tabak muß daher in einer Erniedrigung des Temperaturniveaus liegen.

Diese Hauptforderung steht damit in offensichtlichem Widerspruch zu der in Kap. 4.1 dargestellten Vorgehensweise zur energetischen Optimierung des Trocknungsprozesses, nach der ein Trocknungsprozeß auf einem höheren Temperaturniveau energetisch günstiger verläuft. Aus diesem Grunde muß grundsätzlich für jeden Trocknungsabschnitt sowohl ein Solarenergieeinsatz mit entsprechend niedrigen Temperaturniveau als auch eine konventionelle Beheizung mit hohem Temperaturniveau erwogen werden. Das bedeutet, daß für den gesamten Trocknungsprozeß die Grenzwerte hinsichtlich der Beeinflussung der Produktqualität ermittelt werden müssen. Erst mit Kenntnis dieser Grenzwerte kann eine systematische Untersuchung Aufschluß darüber geben, wie der Prozeß durchgeführt werden muß, um den Einsatz konventioneller Energieträger zu minimieren.

5. Experimentelle Untersuchung des Einflusses geänderter Prozeßparameter auf den Trocknungsverlauf und die Qualität von Tabak

5.1. Ziel der experimentellen Untersuchungen

Ausgehend von den in Kap.4 formulierten grundlegenden Forderungen für eine Optimierung stellen sich die Ziele einer experimentellen Untersuchung wie folgt dar:

1. mögliche Luftzustände zur Erzielung einer guten Produktqualität zu finden;
2. eine mathematische Beschreibung des Stoffübergangs zur rechnerischen Simulation zu erhalten.

Damit ergeben sich für die Untersuchung der qualitätsbestimmenden Faktoren folgende Ziele, die sich im wesentlichen aus dem Trocknungsprozeß des Tabaks ableiten (s.Kap. 3, bzw.A2-A5):

a) Der Vergilbungsprozeß

Einfluß der Trocknungsgeschwindigkeit, variiert durch Änderung der rel. Feuchte

Einfluß der absoluten Temperatur

Einfluß von tageszeitabhängigen Schwankungen der Temperatur

b) Der Farbfixierungsprozeß

Einfluß der vorangegangenen Vergilbung (Wassergehalt)

Einfluß der absoluten Temperatur

Einfluß der Trocknungsgeschwindigkeit durch Änderung der rel. Feuchte

Einfluß von kurzzeitigen Abweichungen vom Idealprozeß

c) Der eigentliche Trocknungsprozeß (Blatt-/Rippentrocknung)

Einfluß der Trocknungsgeschwindigkeit durch Änderung der
rel. Feuchte

Einfluß der absoluten Temperatur

Anders als bei technischen Produkten müssen bei den experimentellen Versuchen unterschiedliche Eingangsvoraussetzungen des "Naturproduktes Tabak" berücksichtigt werden. Diese sind zum einen durch abweichende Wachstums- und Klimabedingungen von Jahr zu Jahr unterschiedlich, zum anderen ergeben sich aufgrund der zeitlich aufeinanderfolgenden Ernten Unterschiede, die im zwischenzeitlichem Wachstum der Pflanze und in nicht identischen Erntebedingungen begründet sind. Aufgrund dieser Unterschiede im Tabak selbst, die sich durch die Größen Reife, Erntestufe und Trockengewicht ausdrücken lassen, müssen die in den Punkten (a) bis (c) genannten Ziele auch in deren Abhängigkeit ermittelt werden.

Zur energetischen Berechnung und Beurteilung der durchgeführten Prozesse ist weiterhin die Bestimmung der Stoffübergangsvorgänge notwendig, um den Energieverbrauch bzw. das mögliche Einsparpotential durch Sonnenenergie abschätzen zu können. Eine mathematische Beschreibung des Trocknungsverlaufes in Abhängigkeit der Prozeßparameter ergibt zudem die Möglichkeit, systematische Optimierungs- bzw. Simulationsrechnungen durchführen zu können.

5.2. Beschreibung der Versuchsanlage

Um die vorgenannten Zielrichtungen zu untersuchen und um den Erfordernissen des "Naturproduktes Tabak" gerecht zu werden, wurde eine Versuchsanlage errichtet, die folgenden Kriterien genügt:

1. Eliminierung des Anfangszustandes auf das Ergebnis durch parallele Versuchsdurchführung;
2. Vollständige Klimatisierung der Versuchstrockner mit voneinander unabhängigen Regelungsmöglichkeiten für die Größen Lufttemperatur, -feuchte und -geschwindigkeit;
3. Erfassung der Zustandsgrößen der Luft und deren Geschwindigkeit;
4. Erfassung des Trocknungsverlaufes.

Zur Erfüllung der genannten Kriterien wurden zwei identische Versuchstrockner, deren Schaubild Abb. 5.1 zeigt, aufgebaut /35/, bestehend aus einer Trockenkammer zur Aufnahme des Trockengutes, Einrichtungen zur Strömungsgleichrichtung, elektrischen Lufterhitzern, Befeuchtungsanlage, Ventilator, Meßstrecke für den geförderten Luftmassenstrom und einer Kühlungs- und Entfeuchtungsanlage sowie den Meßeinrichtungen für Lufttemperatur und -feuchte vor und hinter der Meßkammer (s. dazu auch /36/, /37/). Zusätzlich zu diesen Trockenkammern stehen zwei Klimaschränke mit Meßeinrichtungen zur Durchführung weiterer Versuche zur Verfügung.

Dieser apparative Aufwand ist notwendig (wie in Kap.5.1 dargestellt), da sowohl die Anzahl der Versuchsreihen sehr begrenzt ist, als auch dadurch, daß sich die Versuchsreihen untereinander stark unterscheiden.

Denn nur durch parallele Versuchsdurchführung mit gleichzeitiger Durchführung eines Standardprozesses als Vergleichsprozess kann eine eindeutige Abhängigkeit vom variierten

Prozeßparameter nachgewiesen werden. Über den Vergleichsprozeß mit Standardbedingungen sind Verknüpfungen der Versuchsserien untereinander möglich. Einen Überblick über die Versuchseinrichtungen und deren Meß- und Regelungseinrichtungen und die Genauigkeiten der benutzten Geräte gibt Anhang A6.

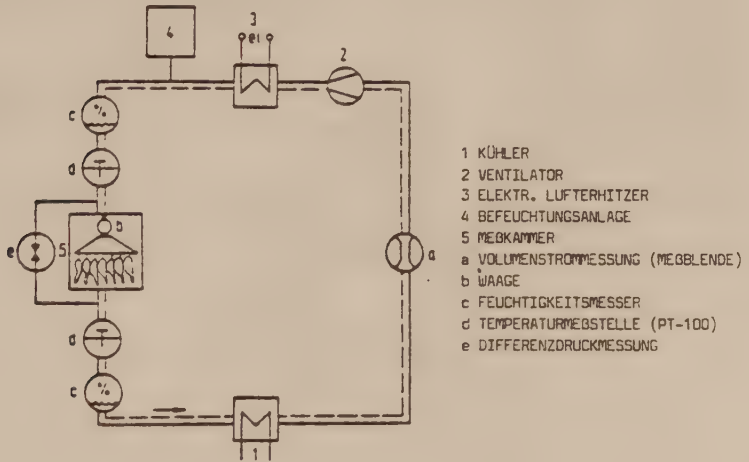


Abb. 5.1: Schematischer Aufbau der Versuchstrockner

5.3. Durchführung der Meßreihen

Aufgrund der im Anhang A3/A4 beschriebenen Erntepraktiken standen für Versuchszwecke pro Jahr drei (maximal vier) Chargen Tabak zur Verfügung. In der zur Verfügung stehenden Zeit konnten insgesamt zehn Versuchsreihen durchgeführt werden. Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über die Versuchsdurchführung.

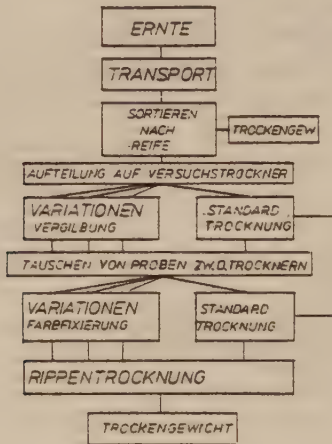


Abb. 5.2: Schematische Versuchsdurchführung

Die Variationen wurden dann derartig durchgeführt, daß pro Kammer nur eine Größe verändert wurde, um die Abhängigkeit eindeutig festlegen zu können. Wegen des von Versuch zu Versuch unterschiedlichen Tabaks mußte zusätzlich ein Vergleichsversuch mit den Standardbedingungen durchgeführt werden. Diese Maßnahmen führten zu einer unvermeidlichen Reduktion an verwertbaren Versuchsvariationen.

Zur Eingrenzung der qualitätserhaltenden Faktoren wurden systematische Variationen hinsichtlich der in Kap. 5.1. genannten Zielsetzungen durchgeführt. Dies sind im wesentlichen Variationen von T und φ in Abhängigkeit von der Zyklusdauer.

Abbildung 5.3 zeigt den Bereich, in dem Variationen durchgeführt wurden.

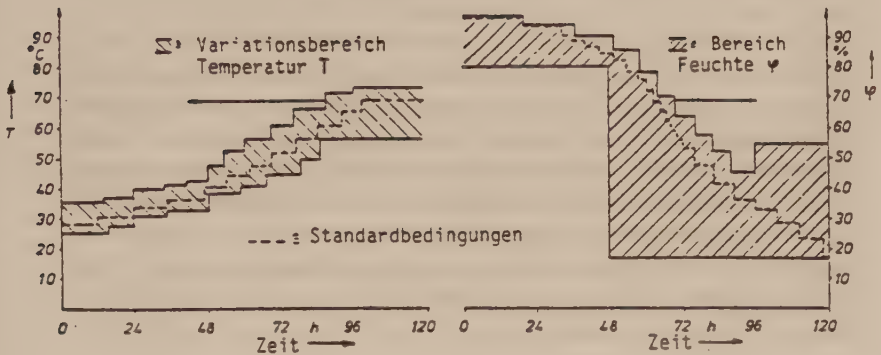


Abb. 5.3: Bereich der Temperatur- und relativen Feuchtevariation, aufgetragen über der Zyklusdauer.

Dabei muß wegen des in Abhängigkeit der Temperatur nicht-linearen Verlaufes des Sättigungsdampfdruckes berücksichtigt werden, daß die "treibende Kraft" für den Stofftransport die Dampfdruckdifferenz zwischen Blatt und der Trocknungsluft ist und die relative Luftfeuchte nur dazu benutzt wird, diese Dampfdruckdifferenz linear zu verändern.

$$P_{\text{Diff}} = P_{\text{S}(T)} \cdot (1 - \varphi)$$

Somit war streng genommen die Variationsgröße nicht φ , sondern P_{Diff} . Die Größe der relativen Luftfeuchte wird nur wegen der mit Literaturangaben übereinstimmenden Darstellung verwendet. Außerdem ist sie der für die Praxis relevante Wert, da im Trockner nur die relative Luftfeuchtigkeit gemessen und geregelt wird und dieser Wert für den Anwender eine bekannte und meßbare Größe darstellt.

5.4. Ergebnisse der Trocknungsversuche

5.4.1. Beeinflussung der Qualität während der Vergilbung

Wie bereits in Kap. 3.3. beschrieben, geschieht während der Vergilbung unter anderem der Chlorophyllabbau durch einen enzymatischen Prozeß, genannt Chlorophyllase. Die Aktivität dieser Enzyme ist temperaturabhängig, und zwar in der Weise, daß mit steigender Temperatur auch eine verstärkte Aktivität zu verzeichnen ist. Untersuchungen von Kitzmann /38/ für Burley-Tabak zeigen zwei relative Aktivitätsmaxima, eins bei 40 °C und ein weiteres bei etwa 60 °C. Abb. 5.4 gibt den Aktivitätsverlauf wieder.

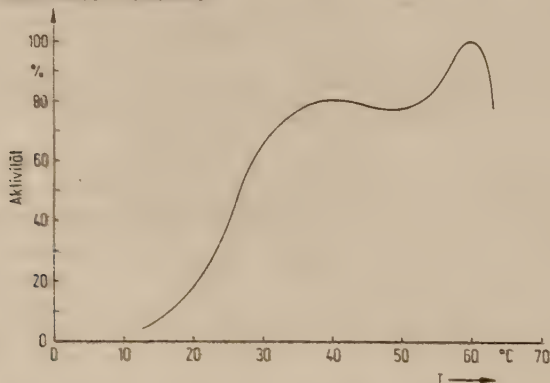


Abb. 5.4: Temperaturabhängigkeit der Aktivität der Chlorophyllase nach /38/

Eine Untersuchung von Tanaka /39/, gemessen an Roggen, zeigt einen ähnlichen Verlauf mit einem Maximum bei etwa 30 °C, wobei aber eine Bestimmung der Aktivität für höhere Temperaturen nicht erfolgte. In veröffentlichten Prozeßvorgaben für die Trocknung von Virginia-Tabak /40/ wird eine Temperaturobergrenze von 41 °C genannt. Diese unterschiedlichen Aussagen zeigen, daß die Aktivität noch von anderen Parametern abhängig sein muß oder nicht identische Versuchsbedingungen vorlagen. Eine Überprüfung in eigenen Versuchen ergab,

daß die von Kitzmann gemessenen Werte weitestgehend reproduziert werden konnten. Sie lassen jedoch eine starke Abhängigkeit der Chlorophyllase vom Wassergehalt des Tabaks erkennen. Kitzmann gab an, daß der Wassergehalt über 65 % liegen muß, dies konnte durch eigene Messungen jedoch nicht bestätigt werden, hier wurde ein Chlorophyllabbau bis 55%, in einigen Fällen sogar noch bei 50% Wassergehalt festgestellt. Ferner konnte nachgewiesen werden, daß die Aktivität bei sehr hohen Wassergehalten stark zurückgeht, was sich in einer Verlängerung der Vergilbungszeiten äußert. Abb. 5.5 zeigt die Vergilbungsdauer als ein Maß für den Chlorophyllabbau in Abhängigkeit des Trocknungsverlaufes. Die dargestellte Vergilbungsdauer ergibt sich aus der Trocknungszeit, die zur Erzielung der vorgegebenen Gelbfärbung benötigt wird.

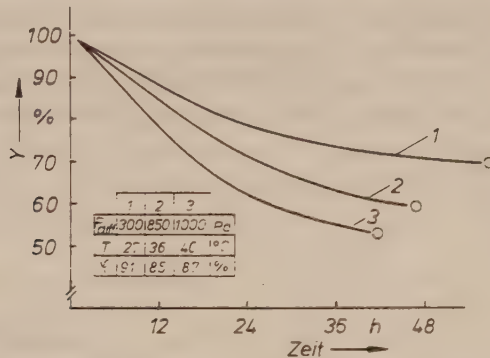


Abb. 5.5: Vergilbungsdauer in Abhängigkeit des Trocknungsverlaufes; angegeben sind für die gemessenen Versuche die Lufttemperatur T in °C, φ in %, P_{Diff} in Pa

Diese Korrelation ist mit der Tatsache zu erklären, daß das Blatt im Anfangstadium der Trocknung, also bei hohem Wassergehalt, als noch lebend betrachtet werden muß und deshalb alle Abbauvorgänge unterdrückt werden. Als oberes Temperaturlimit wurde 43 °C gefunden. Dies steht jedoch nicht im Widerspruch zu der in Abbildung 5.4 dargestellten Kurve, da bei höheren Temperaturen (also ab 45 °C) andere parallel ablaufende Prozesse die Chlorophyllase überlagern. Diese sind z.B. Oxydationsprozesse, die eine Braunfärbung bewirken,

und bei der Virginia-Trocknung unerwünscht sind (siehe dazu auch das anschließende Kap. Farbfixierung). Im Gegensatz zu der einfach zu handhabenden Größe "Temperatur" ist der Wassergehalt ein Wert, der zum einen aus dem Trocknungsprozeß resultiert, also vom Stoffübergang während des Vergilbungsvorgangs abhängig ist, zum anderen aber auch vom Tabak selbst beeinflusst wird, insbesondere durch den Trockengewichtsanteil, die Reife und Erntestufe, deren Einfluß in Kap.6. dargestellt ist. Zusätzlich wird der Stoffübergang auch durch das Temperaturniveau beeinflusst (bei gleicher Dampfdruckdifferenz), was zum einen durch die temperaturabhängigen Prozesse und zum anderen durch die Diffusionsgleichung (s. Kap. 5.4.2) bedingt ist. Abbildung 5.5 zeigt auch die Abhängigkeit des Wassergehaltes von der herrschenden Dampfdruckdifferenz aufgetragen über der Zeit. Abbildung 5.6 gibt den zeitlichen Wassergehaltsverlauf für einen identischen Dampfdruck jedoch bei unterschiedlichem Temperaturniveau (konstant gehalten über eine Variation der relativen Luftfeuchte) wieder.

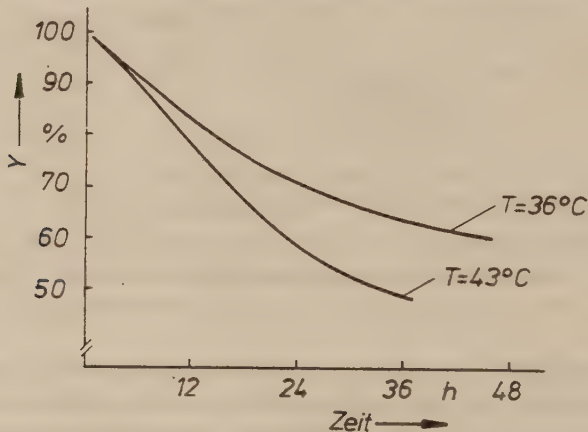


Abb. 5.6: Trocknungsverlauf bei gleichem Dampfdruck, jedoch bei unterschiedlichem Temperaturniveau

Aus diesem Grunde kann die Trocknung nur aufgrund von Erfahrungswerten bzw. einer Simulationsrechnung durchgeführt wer-

den, da der Endwassergehalt zum Ende der Vergilbung nicht unterschritten werden darf. Es gilt also, den Wasserverlust so zu steuern, daß nach Abbau des Chlorophylls der Wassergehalt nicht unter 55 % zu liegen kommt. Die Größe, mit der sich der Wasserverlust beeinflussen läßt, ist neben der Temperatur die relative Luftfeuchtigkeit im Trockner. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß der Stoffübergang bei gleichen Ausgangsvoraussetzungen und gleichem Temperaturniveau der Dampfdruckdifferenz etwa proportional ist (eine exaktere Darstellung ist dem Kap. 6 "Math. Beschreibung des Trocknungsverlaufes" zu entnehmen). Deutlich erkennbar ist jedoch auch eine Abhängigkeit von der Aktivität der Chlorophyllase, wobei mit steigender Aktivität nicht nur eine deutliche Verkürzung der Vergilbungszeiten festzustellen ist, sondern auch eine wesentlich erhöhte Wasserabgabe, also eine Verkürzung der Trocknungszeiten. Die Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit ist in weiten Grenzen zu vernachlässigen, wenn der Luftmassenstrom so gewählt ist, daß während der Interaktion von Luft und Tabak die Luft nicht in den Sättigungszustand gerät. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die möglichen Luftzustände während der Trocknung:

max. Partialdruckdifferenz	1500 Pa
min. Partialdruckdifferenz	500 Pa
max. Temperatur	43 °C
min. Temperatur	20 °C
max. Wassergehalt nach der Vergilbung	75 %
min. Wassergehalt nach der Vergilbung	55 %

Tabelle 5.1: Während der Vergilbung einzuhaltende Luftzustände

Die Begrenzung der Partialdruckdifferenz ergibt sich aus einer Beeinflussung der Produktqualität. Bei Überschreiten des Maximalwertes wird die Chlorophyllase abgebrochen, obwohl die gewünschte Färbung noch nicht erreicht wurde, weil der Wassergehalt zu schnell absinkt. Eine Unterschreitung des geforderten Wertes läßt die Chlorophyllase zu langsam verlaufen, so daß Oxydationsprozesse diese überlagern, die Folge

ist eine Braunverfärbung. Die Anforderungen bezüglich der Temperatur ergeben sich ebenfalls aus Gründen einer Qualitätsbeeinflussung. Überschreiten der Temperatur führt in kürzester Zeit (wenige Minuten) zu einer Braunverfärbung. Unterschreiten des Temperaturgrenzwertes verlängert die Vergilbungszeit und führt ebenfalls zu einer Braunverfärbung. Unterschreiten der angegebenen Werte für Temperatur und Partialdruckdifferenz ist jedoch bis zu 2 - 3 Stunden ohne negative Auswirkungen möglich, ebenso ein Überschreiten der Partialdruckdifferenz in der gleichen Größenordnung. Die geforderten Werte bezüglich des Wassergehaltes sind eine Folge der vorgenannten Forderungen und ergeben sich bei Einhaltung des Temperatur- und Partialdruckbereiches.

Ein weiteres Ergebnis ist, daß der von der Landesanstalt für Pflanzenschutz und Tabakforschung in Forchheim als Standardzyklus veröffentlichte Prozeß /10/ keine optimalen Qualitäten erzeugt. Die Trocknung verläuft zu langsam, weil das Temperaturniveau zu niedrig ist. Da von Orbeck /25/ nicht der Meßort für die angegebenen Werte genannt wird, liegt die Vermutung nahe, daß es sich um die Austrittsluftzustände handelt.

5.4.2 Einfluß der Prozeßführung auf die Farbfixierung und die Blatttrocknung

Die Farbfixierung hat die Aufgabe, die in der Vergilbung erzeugte Färbung zu erhalten und zu konservieren. Dies ist notwendig, da innerhalb des Blattes mit dem Ende des Chlorophyllabbaues Oxydationsvorgänge einsetzen, die eine unerwünschte Braunfärbung bewirken (s.Kap.3.4). Es handelt sich dabei unter anderem um die Oxydation von noch nicht in Zucker umgewandelter Stärke.¹ Dieser Prozeß ist nur durch das Eindringen von Luftsauerstoff in die Zellen möglich, was bedeutet, daß sich die Zellstruktur verändert haben muß. Dies ist in der Tat der Fall, da mit fortschreitendem Trocknungsprozeß die zwischen Blatt und Trocknungsluft herrschende Dampfdruckdifferenz permanent gesteigert wird, was dann zum Aufplatzen der Organellen führt. Damit kann Luftsauerstoff in die Zellen gelangen, und Oxydationsprozesse setzen ein² (s. dazu auch einen typischen Trocknungsverlauf dargestellt im Anhang A7). Die Oxydation ist jedoch nur in Verbindung mit einem bestimmten Wassergehalt möglich und zudem in ihrer Aktivität temperaturabhängig. Diese Aussagen lassen sich auch mit den durchgeführten Experimenten anschaulich belegen. (s.Anhang A7).

¹ Wie bereits in Kap.3.3 gezeigt, können die Farbveränderungen jedoch nicht nur auf einen einzelnen chemischen Prozeß zurückgeführt werden; es handelt sich um eine Vielzahl von in der Mehrzahl unbekannten Prozessen. Walker /7/ spricht auch von enzymatischen Prozessen (Umwandlung der Polyphenole); damit ist die Kopplung der Braunpigmentierung an einen Wassergehalt verständlicher.

² Wegmann und Kitzmann /19/ haben die Theorie entwickelt, daß die Polyphenole durch Carotinverbindungen vor einer Oxydation geschützt werden.

5.4.2.1 Einfluß des Anfangswassergehaltes

Der Einfluß von unterschiedlichem Wassergehalt nach der Vergilbung wurde in der Versuchsdurchführung durch Umhängen von Proben mit unterschiedlicher Vorgeschichte zwischen den einzelnen Trocknern untersucht. Es konnte unter der Voraussetzung, daß die Endwassergehalte nach der Vergilbung in den angegebenen Grenzen liegen ($0.55 < Y < 0.7$), keine eindeutige Auswirkung auf die Qualität festgestellt werden. Ist der Wassergehalt nicht in dieser Größenordnung, so muß dieser Einfluß sehr wohl berücksichtigt werden. Dies ist in den folgenden Ausführungen über den Einfluß des Temperaturniveaus und der Trocknungsgeschwindigkeit, soweit eine Abhängigkeit besteht, vermerkt.

5.4.2.2 Einfluß des Temperaturniveaus und der Trocknungsgeschwindigkeit

Ausgehend von dem von Brauer /41/ formulierten Ansatz für die äquimolare Diffusion:¹

$$\dot{M}_A = - D / (T \cdot R / u_A) \cdot dp_A / dy \quad (5.2)$$

ergibt sich der Diffusionsstrom als Funktion der Temperatur und des Partialdruckgefälles. Da der Sättigungsdruck des Wassers in der Luft eine Funktion der Temperatur ist, hängt der Diffusionsstrom bzw. die Trocknungsgeschwindigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ab. Aus diesem Grunde ist der Einfluß des Temperaturniveaus auf den Ablauf der chemischen Prozesse nicht isoliert betrachtbar, da die Trocknungsgeschwindigkeit wesentlich durch die Temperaturabhängigkeit der treibenden Dampfdruckdifferenz bestimmt wird.

¹ Brauer bezeichnet mit Index A die Komponente A, R als allgemeine Gaskonstante, R/u_A als die individuelle Gaskonstante des Mediums A. Die Vereinfachung durch Betrachtung des Problems als äquimolare Diffusion ist nach Brauer für den Fall, daß der Partialdruck der Komponente A gegenüber dem Gesamtdruck vernachlässigbar ist, wie es bei der Tabaktrocknung der Fall ist, zulässig.

Üblicherweise wird der Farbfixierungsprozeß analog zu den Steuerungen der Trockner beschrieben, also durch Vorgabe der Temperatur und der relativen Feuchte in Abhängigkeit der Zeit. Diese Darstellungen sind als eine Produktionsvorschrift für den Tabakanbauer zu verstehen. Für die Berechnungen des Trocknungsprozesses fehlen jedoch wichtige Randbedingungen wie Wassergehalt und der Ort dieser Vorgabedaten, bzw. es werden nur sehr unpräzise Angaben dazu gemacht. Diese sind zwar für jeden Tabakproduzenten oftmals sehr griffige Werte, sind aber in dieser Arbeit nicht anwendbar. Als Beispiel seien die Angaben zur Blatttrocknung von Moss und Teter /42/ angegeben. Nach dieser Arbeit ist die Temperatur im Trockner mit 1-2 Gradschritten pro Stunde zu erhöhen und die relative Luftfeuchte durch stetiges Öffnen der Luftaustauschklappen zu senken. Der Zustand ist beizubehalten, bis die Blattspitzen abgetrocknet sind.

Präzisere Angaben veröffentlichte Hassler /43/. Er fand z.B., daß der Tabak bei Temperaturen über 57°C und einer relativen Feuchte von 70 % nach sechs Minuten eine Braunverfärbung aufweist. Seine Angaben lassen jedoch keine Schlüsse auf eine Abhängigkeit von Temperatur bzw. Trocknungsgeschwindigkeit und Ausgangswassergehalt erkennen. Zudem sind seine Daten nur punktuell ermittelt und ergeben keine für den Anwendungsfall der Sonnenenergienutzung relevanten Werte, die sich auf einen Zeitraum von mehreren Stunden erstrecken müßten.

Walkers Untersuchungen /7/ haben zwar eine entgegengesetzte Zielrichtung, nämlich optimale Trocknungsbedingungen für die Heißlufttrocknung zu finden, aber seine Vorgehensweise ist analog zu der hier gewählten. Eine Betrachtung seiner Ergebnisse ergibt jedoch keine quantitativen Werte, die für die angesprochene Problemstellung verwendet werden könnten. Zudem ermittelte Walker Verschlechterungen der Qualität aufgrund von Farbuntersuchungen bei Trocknungsverläufen, die von den deutschen Rohtabakaufkäufern als Optimum bezeichnet werden /44/. Seine Ergebnisse konnten durch eigene Messungen auch nicht bestätigt werden. Die Ursachen für die Abweichungen

können mit unterschiedlichen Tabaksorten erklärt werden. Seine Untersuchungen beziehen sich auf "Ontario flue-cured tobaccos"; dieser dürfte zudem anderen klimatischen Bedingungen ausgesetzt gewesen sein. Zur Veranschaulichung des unterschiedlichen Trocknungsverhaltens verschiedener US-amerikanischer Sorten siehe Chang et al /14/.

Qualitativ stimmen Walkers Ergebnisse mit den hier durchgeführten Versuchen überein.

Übereinstimmend schreiben alle Autoren für den Beginn der Farbfixierung eine stetige Temperaturerhöhung bei gleichzeitiger Reduktion der relativen Feuchte vor. In der Praxis wird diese Vorschrift meist jedoch nicht eingehalten, da die Trockner oftmals nur manuelle Einstellmöglichkeiten der Regler besitzen, so daß zur Zeitersparnis die Temperatur sprunghaft erhöht wird. Dieser Einfluß wurde deshalb ebenso untersucht. Festgestellt wurden dabei Auswirkungen auf die Qualität in Abhängigkeit des Wassergehaltes und des Temperaturniveaus nach der Vergilbung. Die Temperatursprünge sollen bei der untersuchten Sorte folgende Werte nicht überschreiten:

$$\Delta T_{\text{Max}} = T(t=t_v) * 0,1 * Y \quad (5.2)$$

Die Größenordnung dieses Wertes liegt bei 5 - 8 K je nach Trocknungsfortschritt. Derartig hohe Temperatursteigerungen sind jedoch an eine hohe Trocknungsgeschwindigkeit, die nur über hohe Luftaustauschraten möglich sind, gebunden. Starke Temperatursteigerungen bei gleichzeitig hoher relativer Luftfeuchtigkeit führen zu einer Braunfärbung des Tabaks, ein Effekt, der als "scalding" bezeichnet wird und bei relativen Feuchten von mehr als 70 % innerhalb von einigen Minuten auftritt. Ursache ist eine zu niedrige Trocknungsgeschwindigkeit bei hohem Temperaturniveau und entsprechend höherer Aktivität der ablaufenden chemischen Reaktionen.

Den Einfluß des Temperaturniveaus und der Trocknungsgeschwindigkeit (Wasserabgabe pro Zeiteinheit) auf die Farbfixierung zeigt die Graphik in Abbildung 5.8. Die Erhöhungen symboli-

sieren die Zeitdauer, bei der ein normal vergilbter Tabak bei entsprechender Temperatur und Trocknungsgeschwindigkeit getrocknet werden kann, ohne daß eine Braunverfärbung auftritt.

Eine Betrachtung der Graphik unter dem Gesichtspunkt der Solarenergienutzung, also der Trocknung auf niedrigem Temperaturniveau, zeigt deutlich, daß bei geringen Trocknungsgeschwindigkeiten (0.01 – 0.02 kg/kg h) die Qualität bei höheren Temperaturen ($T > 30$ bzw. 35°C) eher beeinträchtigt wird. Dies ist auf die Temperaturabhängigkeit der ablaufenden chemischen Prozesse zurückzuführen. Zur Illustration ist ein entsprechendes Beispiel für den Fall einer identischen Trocknungsgeschwindigkeit (0.02 kg/kg h) bei unterschiedlichem Temperaturniveau (30 bzw. 35°C durch $\bullet$ gekennzeichnet) eingezeichnet.

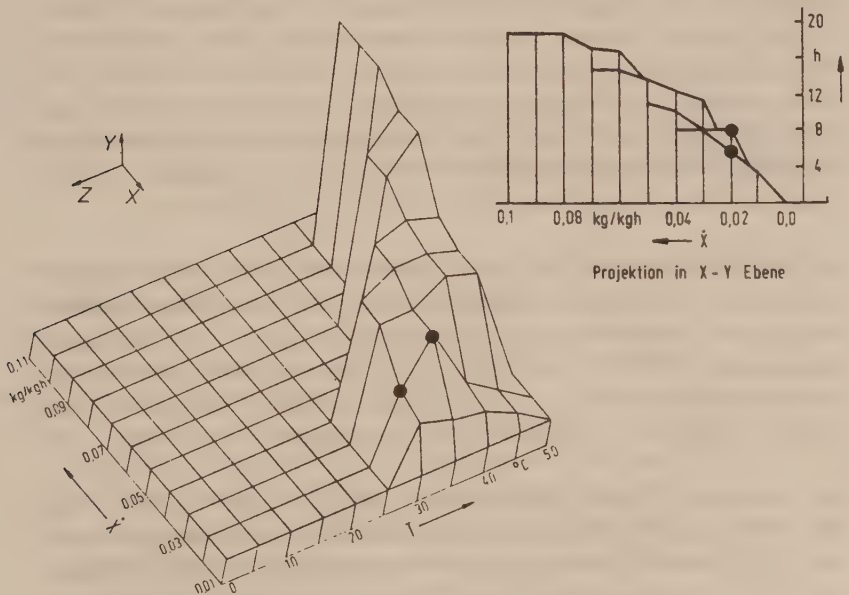


Abb. 5.8: Trocknungsdauer, nach der eine Beeinträchtigung der Qualität eintritt, in Abhängigkeit von der Temperatur und der Trocknungsgeschwindigkeit

Ein Trocknungsprozeß auf einem niedrigen Temperaturniveau bedingt jedoch zur Erzielung dieser Trocknungsgeschwindigkeit vollständigen Luftaustausch. Zudem muß für eine derartige Prozeßführung eine Einschränkung gemacht werden, da ein Effekt auftritt, der als "auslaufende Rippen" bezeichnet wird. Dabei verfärbt sich der Bereich um die Mittelrippe sowie an den Ansätzen zu den stärkeren Verästelungen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß zwar Wasser aus dem Blatt abgeführt wird, jedoch zum einen der Stoffübergang von der Rippe an die Umgebung sehr viel schlechter ist als vom Blatt selbst, zum anderen das innerhalb des Blattes enthaltene Wasser nicht gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt ist, sondern vielmehr sich innerhalb der Rippen ein erhöhter Anteil befindet. Aufgrund des auftretenden Gradienten zwischen Blatt und Rippe kommt es zu Diffusionsvorgängen, d.h. zu einer Wasserabgabe von der Rippe zu den angrenzenden Blattzonen. Unterstützt werden diese Vorgänge zudem durch noch vorhandene Kapillarstrukturen des Blattes. Diese Wasserabgabe führt zu einem so hohen örtlichen Wassergehalt, daß dort Verfärbungen auftreten können. Diese Verfärbungen werden nach chemischen Analysen von den Tabakaufkäufern akzeptiert, sollten jedoch nicht die Regel sein /45/.

Korrespondierend zu den in der Abbildung 5.8 dargestellten möglichen Qualitätsbeeinträchtigungen durch bestimmte Temperaturen und Trocknungsgeschwindigkeiten zeigt die folgende Abbildung 5.9 die Luftzustände, die zur Erzielung der Trocknungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Feuchte eingestellt werden müssen.

Bei Anwendung dieser Graphik muß berücksichtigt werden, daß der Trocknungsverlauf nicht nur von den Luftzuständen abhängig ist, sondern sich auch durch tabakabhängige Größen verändert. Als tabakabhängige Größen für die Trocknung sind insbesondere Trockengewicht und Reife anzusehen. Die in Abb. 5.9 dargestellten Werte beziehen sich auf ein mittleres Trockengewicht von 15% und normal gereiften Tabak. Bei Abweichungen von diesen Werten ist eine Korrektur vorzunehmen, deren Fak-

toren der im Kap.6 dargestellten Funktionen zu entnehmen sind.

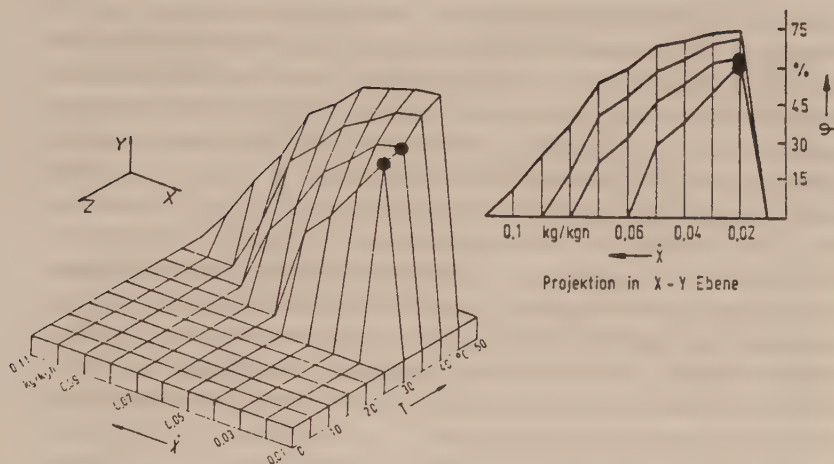


Abb.5.9: Luftzustände zur Erzielung der in der X-Achse aufgetragenen Trocknungsgeschwindigkeiten während der Farbfixierung von Virginia-Tabak

Zusammenfassend ergeben sich für die Farbfixierung folgende Ergebnisse zur Erzielung einer optimalen Qualität:

1. höhere Temperatur erfordert höhere Trocknungsgeschwindigkeit ($T > 35^{\circ}\text{C}$)
2. Temperaturen über 45°C sind zu Beginn zu vermeiden
3. Temperaturen über 50°C führen zu einer massiven Beeinträchtigung der Qualität (Braunverfärbung)
4. Bei niedrigen Temperaturen sind zur Erzielung der notwendigen Trocknungsgeschwindigkeit hohe Luftaustausch-raten erforderlich ($\varphi < 40\%$).
5. Bei geringer Trocknungsgeschwindigkeit und niedriger Temperatur kann es bei Wassergehalten von $0.5 < Y < 0.7$ zum Effekt der "auslaufenden Rippen" kommen.
6. Die Gefahr einer Oxydation der Polyphenole ist bei Wassergehalten $Y < 0.4$ gegeben.

5.4.3 Einfluß der Prozeßführung auf die Rippentrocknung

Der letzte Trocknungsabschnitt, die Rippentrocknung, hat die Aufgabe einer Konservierung bzw. soll die Lagerfähigkeit des Tabaks ermöglichen, also die Gründe, die für die Anwendung der Erntetrocknung sprechen. Die chemischen Veränderungen haben innerhalb der vorherigen Phasen stattgefunden, und die Blätter sind mit Ausnahme der Mittelrippe vollkommen getrocknet. Die Trocknung dieser Rippe dient allein der Erhaltung des im bisherigen Trocknungsprozeß erreichten Zustandes. Qualitative Aspekte spielen bei diesem Vorgang nur insofern eine Rolle, daß bei einer Unterlassung dieser Phase Schimmelprozesse einsetzen, die zur vollkommenen Zerstörung des Tabaks führen. Von daher ist es möglich, den Tabak unter rein trocknungstechnischen Aspekten zu betrachten, wenn folgende Einschränkungen beachtet werden:

1. Tabak ist ein hygrokopisches Gut
 - durch Sorptionsvorgänge kann der Wassergehalt der Blätter wieder ansteigen; die Folge eines erhöhten Wassergehaltes im Blattissue wären Farbveränderungen durch wieder einsetzende oxydative Prozesse
2. Tabak ist ein temperaturempfindliches Gut
 - zu hohe Temperaturen führen zu Farbveränderungen, ein Effekt, der von Tabakproduzenten als "ofenrot" bezeichnet wird.

5.4.3.1 Bestimmung der maximalen Trocknungstemperatur

Die maximal mögliche Temperatur während der Trocknung, die über einen längeren Zeitraum beibehalten werden kann, wurde zu: $T_{\text{Max}} = 75^{\circ} \text{C}$ bestimmt (siehe auch /46/).

Kurzzeitiges Überschreiten bis zu einer halben Stunde ist ohne Qualitätseinbußen möglich.

5.4.3.2 Experimentelle Bestimmung von Sorptionsisothermen

Wegen des komplexen Aufbaues organischer Trockengüter lassen sich einzelne Bindungsarten der Feuchtigkeit an das Gut nicht exakt bestimmen. Aus diesem Grunde wird der allgemeine Begriff der Sorption verwendet. Die Stärke der Bindung äußert sich in einer Dampfdruckabsenkung über dem Trocknungsgut und lässt sich mit Hilfe von Sorptionsisothermen in ihrem Verhalten beschreiben. Die Sorptionsisotherme gibt den Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt des Trockengutes und dem zugehörigen Gleichgewichtsdampfdruck wieder. Die Sorptionsisothermen können benutzt werden, um eine Aussage darüber zu treffen, ob Luft mit einer bestimmten relativen Feuchte bzw. einem bestimmten Wasserdampfpartialdruck in der Lage ist, dem hygroskopischen Trockengut Wasser zu entziehen oder wieder Feuchtigkeit zuzuführen. Die Sorptionsisothermen von Tabak wurden für die Temperaturen von 40 °C und 60 °C bestimmt (die 20 °C Isotherme kann der Literatur /26/ entnommen werden). Abbildung 5.10 gibt die entsprechenden Verläufe wieder.

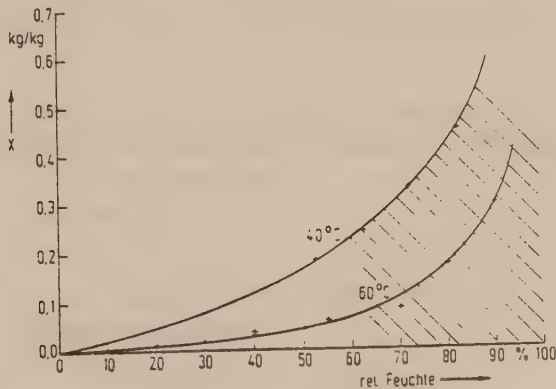


Abb. 5.10: Sorptionsisothermen von Tabak; schraffiert ist der Bereich, in dem eine Farbveränderung durch Wasseraufnahme stattfinden kann

6. Mathematisch physikalische Beschreibung des Trocknungsverlaufes

6.1 Beschreibung der Wärme- und Stoffübergangsvorgänge

Ausgehend von dem in Abbildung 6.1 dargestellten, das Problem der Tabaktrocknung beschreibenden allgemeinen Wärme- und Stoffübergangsvorgang, wurde der Vorgang analog zu den in der Elektrotechnik gebräuchlichen Schaltungen aufgefaßt (Abb. 6.2).

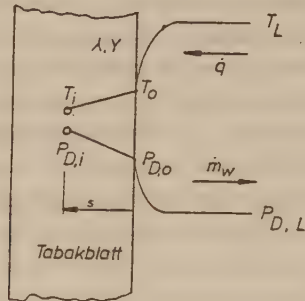


Abb.6.1: Darstellung der Wärme- und Stoffübergangsvorgänge

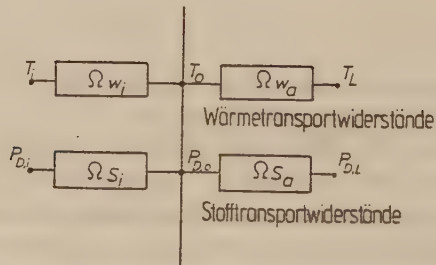


Abb.6.2: Elektrisches Ersatzschaltbild des Wärme- und Stoffübergangsvorganges

Es lassen sich demzufolge vier gleichzeitig ablaufende Einzelvorgänge unterscheiden:

1. Wärmeübergang von der Luft an die Tabakblätter
2. Wärmeleitung von der Oberfläche des Blattes an den Ort der Verdampfung im Inneren des Blattes
3. Stofftransport aus dem Inneren des Blattes an dessen Oberfläche, der mit Phasenwechsel verbunden ist
4. Stoffübergang des Wasserdampfes von der Blattoberfläche an die Trocknungsluft

Für das dargestellte Problem wird die Annahme zugrunde gelegt, daß sich im Inneren des Trockengutes der Flüssigkeitsspiegel befindet, welcher sich mit fortschreitender Trocknung weiter ins Innere des Trockengutes bewegt. Dem Ort des Flüssigkeitsspiegels soll dabei ein der jeweiligen Temperatur entsprechender Sättigungsdruck zugeordnet sein, was beinhaltet, daß keine Dampfdruckabsenkungen stattfinden bzw. explizit berücksichtigt werden. Diese Annahme trifft sicher nur bedingt zu, der gemachte Fehler wird jedoch durch einen erhöhten inneren Widerstand bzw. Diffusionskoeffizienten kompensiert.

Mit einer Energiebilanz läßt sich zeigen, daß der Wärme- und Stofftransport exakt nur durch die Verdampfungsenthalpie und zusätzliche (hier vernachlässigte) Bindungskräfte, wie z.B. Adsorptionsenergie gekoppelt ist:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot (\Delta h_v + r_B) \quad (6.1)$$

Die Einzelvorgänge berechnen sich wie folgt:

$$\dot{m}_w = \frac{\beta}{RT} \cdot (P_{D,O} - P_D(T_L)) = \frac{1}{\Omega_{s,a}} \cdot (P_{D,O} - P_D(T_L)) \quad (6.2)$$

$$\dot{m}_w = \frac{D}{S} \cdot \frac{1}{RT} \cdot (P_D(T_i(s)) - P_{D,O}) = \frac{1}{\Omega_{s,i}} \cdot (P_D(T_i(s)) - P_{D,O}) \quad (6.3)$$

$$\dot{q} = \alpha_a (T_L - T_O) = \frac{1}{\Omega_{w,a}} (T_L - T_O) \quad (6.4)$$

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{S} (T_O - T_i(s)) = \frac{1}{\Omega_{w,i}} (T_O - T_i(s)) \quad (6.5)$$

Durch die Vernachlässigung der Bindungskräfte r_B^* ergibt sich der Diffusionskoeffizient D im Innern aus:

$$\dot{m}_w = \frac{D^*}{S} \frac{1}{RT} (P_S(T_i) - P_{D,O}) \quad (6.6)$$

$$\frac{D^*}{D} = \frac{P_D(T_i)}{P_S(T_i)} \quad (6.7)$$

6.2 Modellierung des Wärme- und Stoffüberganges

6.2.1 Beschreibung des Wärme- und Stoffüberganges durch Widerstände

Für die Darstellung der äußeren Widerstände stehen ausreichend Modelle zur Verfügung, wenn die Geometrie und Strömungsverhältnisse beschreibbar sind. Bei den inneren Widerständen hingegen ist kein Modell befriedigend, wenn wie bei der Tabaktrocknung der innere Widerstand gegenüber den äußeren überwiegt /47/. Eine experimentelle Bestimmung der Einzelwiderstände ist nicht möglich. Aus diesem Grunde wird der experimentell bestimmbare Gesamtwiderstand um die abgeschätzten äußeren Widerstände reduziert. Nach Passamai et al /48/ ergibt sich für den Gesamtwiderstand:

$$\frac{1}{\Omega_{\text{ges}}} = \frac{1}{a\beta_i} + \frac{1}{a\beta_a} + \frac{\Delta h_v}{a\alpha} \left(\frac{dP_s}{dT} \right)_L \quad (6.8)$$

Dieser Gesamtwiderstand setzt sich additiv aus drei Termen zusammen, die inneren und äußeren Stoffübergangswiderstände:

$$\frac{1}{a\beta_i}, \quad \frac{1}{a\beta_a}$$

Der innere Wärmeleitungswiderstand wurde vernachlässigt. Für den konvektiven Wärmeübergangswiderstand ermittelten Passamai et al unter der Annahme kleiner Temperaturdifferenzen:

$$\frac{\Delta h_v}{a\alpha} \left(\frac{dP_s}{dT} \right)_L$$

Die Verdampfungsenthalpie in diesem Term erscheint wegen der Kopplung des Wärme- und Stoffstromes.

Auf Basis dieses Modelles wurde der zeitliche Verlauf des äquivalenten Gesamtwiderstandes $1/\Omega_{\text{ges}}$ aus den Meßwerten von T_L , φ_L , und Y experimentell bestimmt.

Abbildung 6.3 zeigt den Gesamtwiderstand, aufgetragen über dem Trocknungsverlauf für einzelne Versuchsreihen.

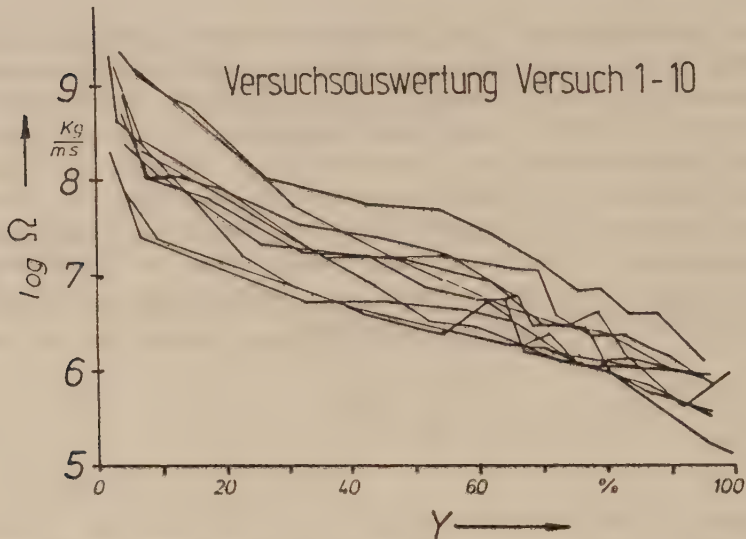


Abb.6.3: Gesamtwiderstand der einzelnen Versuchsreihen in Abhängigkeit des Trocknungsverlaufes (Wassergehaltes)

6.2.2 Diskussion des Wärme- und Stoffübergangsmodelles

Abbildung 6.3 zeigt erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsreihen. Da der äußere Stoffübergangswiderstand bei allen dargestellten Versuchen von der gleichen Größenordnung war, kann aus den Abweichungen nur geschlossen werden, daß die in /48/ vorgeschlagene Gleichung das Problem

nicht mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt. Auch der Ansatz von Brandt /49/ lieferte noch keine befriedigende Lösung.

Eine Analyse dieser Ungenauigkeiten ergab systematische Abweichungen der Versuche untereinander, die sich als tabaksspezifische Größen beschreiben lassen. Ein Einfluß läßt sich für folgende Größen nachweisen:

1. Trockengewicht
2. Reife zum Erntezeitpunkt
3. Blattstand
4. temperaturabhängige Aktivität der biochemischen Prozesse während der Vergilbung

6.3 Modifikation des Wärme- und Stoffübergangsmodelles durch Berücksichtigung pflanzenpezifischer Größen

Zur Berücksichtigung der in Kap. 6.2.2 genannten Einflußgrößen wurde das Modell so modifiziert, daß sich der innere Stoffübergangswiderstand in eine Reihe von Einzelwiderständen aufspaltet. Die Schwierigkeiten der Untersuchungen bestanden in der Unkenntnis der ablaufenden Vorgänge selbst und in deren Komplexität. Bei der Versuchsdurchführung zur größenmäßigen Erfassung dieser Parameter wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Aufstellung eines Axiomes
2. Durchführung eines Experiments zur Isolierung bzw. Variation der postulierten Abhängigkeit
3. Berechnung des Einflusses der untersuchten Größe auf den Stoffübergang
4. Bildung einer Korrekturfunktion
5. Anwendung der Korrekturfunktion auf die bisherigen Versuche
6. Bestätigung bzw. Ablehnung des Axiomes

6.3.1 Beeinflussung des Stoffüberganges durch die Reife des Tabaks

Durch die Literatur /50/, /16/ ist hinlänglich bekannt, daß Tabake mit unterschiedlicher Reife sich im Trocknungsprozeß unterschiedlich verhalten. Die Reife läßt sich anhand der Färbung bestimmen und ist auch ein Maß für den Abbau des Chlorophylls. Zur mathematischen Erfassung dieses Einflusses wurde eine Unterscheidung in 6 Stufen, beruhend auf der Unterscheidungsfähigkeit des menschlichen Auges, vorgenommen (Tabelle 6.1).

<u>Stufe</u>	<u>Kategorie</u>	<u>Beschreibung</u>
0	Überreif	der Tabak ist hellgelb weiße Flecken, welk
1	sehr reif	gelbe bis hellgelbe Farbe
2	reif	gelbgrüne Färbung
3	fast reif	hellgrüne Farbe
4	leicht unreif	grüne Farbe
5	unreif	dunkelgrüne Farbe

Tabelle 6.1: Reifestufen des Virginia-Tabaks

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluß der Reife auf den Stoffübergang bei unterschiedlich gereiftem, jedoch sonst identischem Tabak und gleicher Prozeßführung.

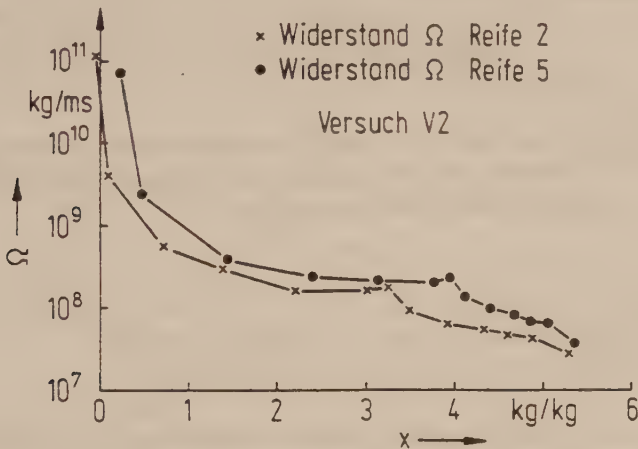


Abb. 6.4: Einfluß der Reife auf den Stoffübergang, dargestellt am gemessenen Gesamtwiderstand zweier Versuche mit Tabaken unterschiedlicher Reife, aufgetragen über dem Trocknungsverlauf

Zur Korrektur des Reifeinflusses wurde auf Basis der experimentellen Ergebnisse eine Funktion gebildet, die diesen Ein-

fluß auf den Stoffübergang berücksichtigt. Den möglichen Anteil am Gesamtwidestand des Tabaks hervorgerufen durch unterschiedliche Reifestufen (s. Taballe 6.1), zeigt eine Sensibilitätsanalyse mit der Korrekturfunktion:

$$\Omega_{\text{Reife}} = \log \Omega_{\text{ges}} * 0,012 * \text{Reifestufe} * Y^{0,8}$$

dargestellt in Abbildung 6.6.

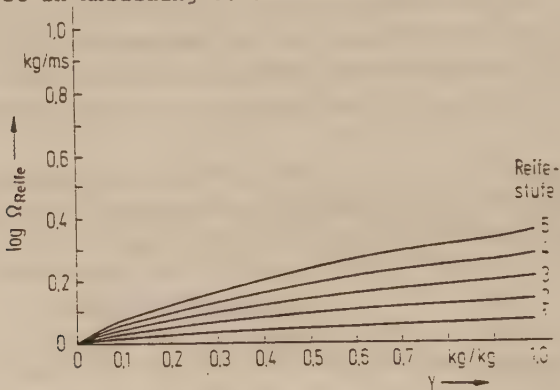


Abb.6.6: Einfluß der Reife auf den Stoffübergangswiderstand;
(Erhöhung des Widerstandes durch unreifen Tabak in
Abhängigkeit der Reifestufen)

6.3.2 Berücksichtigung der Blattstandes und des Trockengewichtes als Teilwiderstände

Wegen der Durchführung der Ernte des Tabaks in mehreren Erntestufen (=Blattstufen) (zur Ernte d. Tabaks s. Anhang A4) liegen die Erntezeitpunkte zeitlich auseinander. Die Folgen sind eine unterschiedliche Versorgung der Pflanze mit Nährstoffen und veränderte Umgebungsbedingungen (Einstrahlung usw.) aufgrund dessen die Pflanze die Beschaffenheit ihrer Blätter verändert, was sich in Größe, Dicke und Trockengewicht niederschlägt /14/,/15/. Dieser Einfluß läßt sich wie im Fall der Reife als ein Teilwiderstand erfassen. Die Vor-

gehensweise ist analog der der Reife, so daß auf eine Darstellung der Beeinflussung des Gesamtwiderstandes wie in Abbildung 6.4 verzichtet wird. Abbildung 6.7 zeigt den aus den experimentellen Daten ermittelten Anteil des Teilwiderstandes Trockengewicht und Blattstand am Gesamtstoffübergangswiderstand in Abhängigkeit dieser Größen. Die Gleichungen, die diesen Sachverhalt verdeutlichen wie ihn auch Abbildung 6.7 zeigt, lautet:

$$\Omega_{\text{Blattstand}} = \log \Omega_{\text{ges}} * (\log(\text{Blattstand})^{0,2}) \quad (6.9)$$

$$\Omega_{\text{Mtr}} = \log \Omega_{\text{ges}} * M_{\text{tr}}^{1,3} \quad (6.10)$$

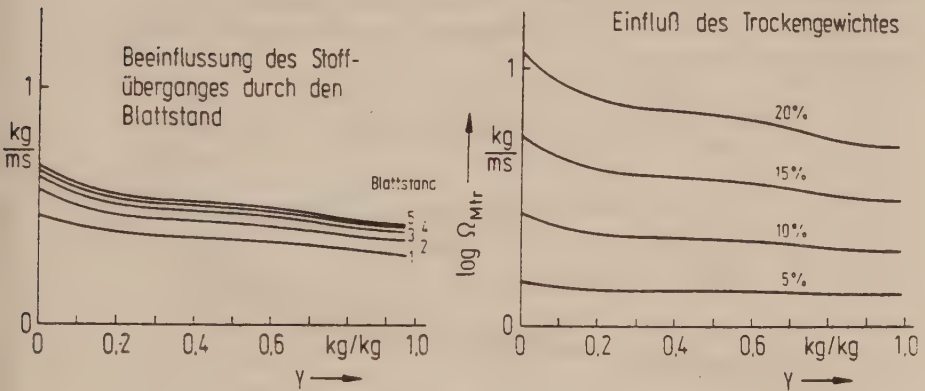


Abb.6.7: Anteile der Teilwiderstände Trockengewicht und Blattstand am Stoffübergangswiderstand in Abhängigkeit des Trockengewichtes und des Blattstandes, aufgetragen über dem Wassergehalt γ

6.3.3 Beeinflussung des Stoffüberganges durch die Prozeßtemperatur

Wie bereits in Kap.5.4 (Abb.5.6) gezeigt, wird der Trocknungsverlauf durch die Prozeßtemperatur erheblich beeinflusst. Dies kann dadurch erklärt werden, daß bei höheren Temperaturen die chemischen Reaktionen eine verstärkte Aktivität besitzen und dadurch zum einen in den Zellen gebundenes Wasser freigesetzt wird, zum anderen diese Reaktionen auch zum Teil exotherm verlaufen, so daß hier eine zusätzliche Energiezufuhr gegeben ist /51/. Abbildung 6.8 gibt den zugehörigen Anteil am Stoffübergangswiderstand wieder, der durch eine negative Abweichung von einer definierten optimalen Temperatur von 45 °C hervorgerufen wird. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Abhängigkeit des Gesamtwiderstandes von der Temperatur ist analog der der vorhergehenden Kapitel 6.3.1, 6.3.2. Die Gleichung 6.12 beschreibt die in Abbildung 6.8 dargestellte Abhängigkeit.

$$\Omega_{\text{Temp}} = \log \Omega_{\text{ges}} * (\Delta T^{0.75}) / 100 \quad (6.12)$$

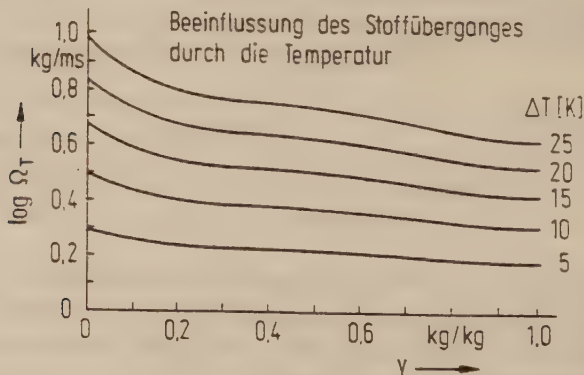


Abb.6.8: Anteil des temperaturabhängigen Teilwiderstandes "biochemische Reaktion" am Stoffübergangswiderstand in Abhängigkeit der Temperatur, aufgetragen über dem Wassergehalt

6.3.4 Darstellung des Gesamtwiderstandes der Versuchsreihen unter Berücksichtigung der Teilwiderstände

Auf Basis der gefundenen Funktionen für die Teilwiderstände wurden die Versuche, dargestellt in Abbildung 6.3, nachgerechnet und der Gesamtwiderstand um die Werte der jeweiligen Teilwiderstände reduziert. Der verbliebene Restwiderstand muß, wenn das Modell den Vorgang beschreibt, von der gleichen Größenordnung für alle Versuche sein (Abb. 6.9). Der Vergleich mit Abb. 6.3 zeigt eine gute Annäherung der Versuchsreihen durch die durchgeführte Berücksichtigung der Teilwiderstände. Leichte Abweichungen ergeben sich jedoch noch bei hohen und bei niedrigen Wassergehalten. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß es sich um Naturprodukte handelt, die zudem unterschiedlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt waren, da sich die Versuche über einen Zeitraum von vier Jahren erstreckten. Das den Gesamtwiderstand

$$\Omega_{\text{ges}} = \Omega + \Omega_{\text{Reife}} + \Omega_{\text{tr}} + \Omega_{\text{Blst}} + \Omega_{\text{Temp}} \quad (6.13)$$

beschreibende Ausgleichspolynom ist dem Anhang A11 zu entnehmen.

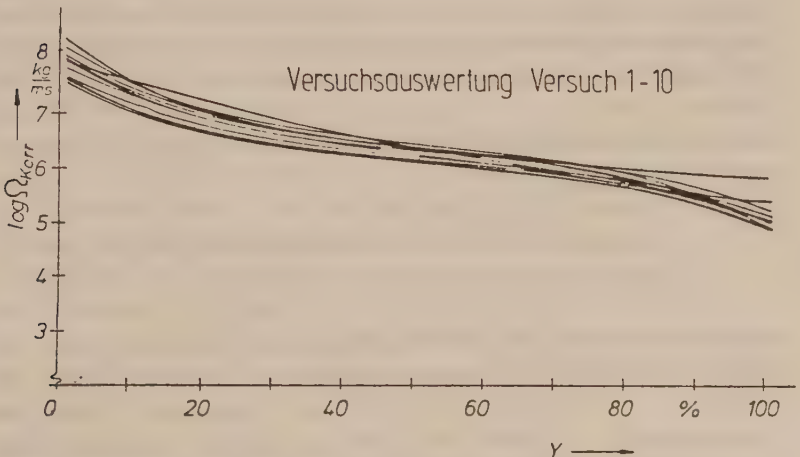


Abb. 6.9: Gesamtwiderstand Ω_{ges} , um die Teilwiderstände Ω_{Reife} , Ω_{Temp} , $\Omega_{\text{Blattstand}}$ und Ω_{tr} reduziert.

6.3.5 Analyse des äußeren Stoffübergangswiderstandes

Nach Passamai /48/, der den äußeren Stoffübergangswiderstand analysierte, und dabei Wärmeübergangsbeziehungen nach /52/ verwendete, berechnet sich der äußere Stoffübergangswiderstand zu:

$$1/\Omega_a = 0.3 \cdot 10^6 \text{ kg/ms}$$

Für den Term zur Berücksichtigung des konvektiven Wärmeüberganges ergibt sich der Wert:

$$1/\Omega_{\text{konv}} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ kg/ms}$$

Die äußeren Widerstände haben damit eine Größenordnung, die während des gesamten Prozesses unter der der inneren Widerstände liegt. Nur zu Beginn der Trocknung ist ihre Größenordnung gleich der der inneren Widerstände. Um diesen etwaigen Einfluß abschätzen zu können, wurden zwei Versuchsreihen mit identischem Prozeß, jedoch mit einem um Faktor 3 unterschiedlichen Massenstrom durchgeführt. Sie ergaben keinen Unterschied im Trocknungsverlauf (s. Anhang A8), der über die Ungenauigkeiten der Meß- und Regeleinrichtungen hinausging, so daß dieser Einfluß vernachlässigt werden kann.

Eine Vernachlässigung der konvektiven Widerstände setzt jedoch voraus:

1. Die Geometrie muß der des Bulk-Curing entsprechen
2. Es darf keine Sättigung der Trocknungsluft eintreten

Damit keine Sättigung der Trocknungsluft eintritt, muß ein Mindestluftdurchsatz gewährleistet sein, der sich aus der maximalen Wasserabgabe während des Zyklusses und des Luftzustandes zu diesem Zeitpunkt bestimmt. Eine Berechnung dieses Wertes wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen (Kap 7.) durchgeführt.

7. Rechnerische Beschreibung des Trocknungsverlaufes

7.1 Modellkonzept

Zu einer Analyse und Optimierung des Trocknungsverlaufes, welche durch Experimente aufgrund der Vielzahl von Einflußgrößen nicht bzw. nur mit einem unververtretbaren Material- und Zeitaufwand durchführbar wären, wurde auf Basis der in Kapitel 6 gewonnenen Stoffübergangsbeziehung und den qualitätsbeeinflussenden Faktoren eine Computersimulation durchgeführt. Zur Theorie der Computersimulation, der Vorgehensweise und der Definition der Begriffe siehe /53/.

Basis der Computersimulation ist die empirisch ermittelte Wärme- und Stoffübergangsbeziehung, die den Trocknungsverlauf des Trockengutes in Abhängigkeit der Luftzustände und des Zustandes des Trockengutes beschreibt. Diese Werte, also Eintrittsluftzustand und Eigenschaften des Trockengutes, sind die Eingangsgrößen des Modelles. Als abhängige Größen ergeben sich der Luftzustand am Austritt des Trockners und der Trocknungsverlauf. Aus diesen Daten sind dann unter Berücksichtigung eines Umgebungsluftzustandes alle relevanten energetischen Größen wie Energieverbrauch, spezifischer Energiebedarf und eventuelle Qualitätsminderungen berechenbar. Einsatzmöglichkeiten von Solarenergie (Substitution anderer Energieträger) sind nach Zugrundelegung eines Systems, das heißt nach Festlegung der Größe, der zu trocknenden Mengen, der Systemeffizienz und der Verluste in der Anlage in Abhängigkeit des Trocknungsverlaufes bestimmbar.

Das dargestellte Modell weicht jedoch erheblich von dem in /54/, /55/ dargestellten ab, da es kein reales System nachbildet, sondern erst die Voraussetzungen für die Auslegung eines solchen realen Systems geben soll.

7.2 Computermodell- und Programmbeschreibung

7.2.1 Parameterdarstellung und Einschränkung

Wie in den vorhergehenden Kapiteln deutlich wurde, ist der Trocknungsprozeß bzw. ein mit Solarenergie betriebener Trockner nur durch eine Vielzahl von Parametern beschreibbar.

- Eintrittszustand der Trocknungsluft im Trockner:
Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit
- Umgebungsbedingungen:
Globalstrahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind
- Betriebsbedingungen:
Leckluftrate, Massenstrom, Beladung
- tabakspezifische Größen:
Trockengewicht, Reife, Blattstand,
Stoffübergang, Qualität
- Eigenschaften des solaren Luftherhitzers:
Wirkungsgradverlauf, Massenstrom, Fläche

Um die Parametervariationen auf einem überschaubaren Umfang zu halten, wurden die tabakspezifischen Einflußgrößen, die Umgebungsbedingungen und die Betriebsbedingungen teilweise konstant gehalten. Tabelle 7.1 zeigt die jeweiligen Vorgaben im Programm:

<u>konstantgehaltene Vorgaben im Simulationsprogramm</u>	
<u>tabakspezifische Größen:</u>	
Reife	2.5
Blattstand	2
Trockengewicht	18.77 %
<u>Umgebungsdaten:</u>	
Strahlung	Datei (s. Anlage A9)
Temperatur	Datei (s. Anlage A9)
Wassergehalt d. Luft	0.010 kg/kg
Wind	3.0 m/s
<u>Betriebsbedingungen:</u>	
Massenstrom	1.1 Kg/s pro 1000kg Tabak
Beladung	1000 kg
<u>Kollektoranlage:</u>	
Wirkungsgradfaktor	0,96
Transparenz der Abdeckungen	0,88 (0,7)
Absorptionskoeffizient	0,96
Wärmedurchgangskoeffizient	5,0 (6,3) W/m^2

Tabelle 7.1: Vorgaben im Simulationsprogramm

Die in Tabelle 7.1 dargestellten Vorgaben sind typische Werte für den Tabak und für einen solarbetriebenen Trockner. Abweichungen von diesen Werten sind entweder leicht berechenbar oder ergeben nur geringfügige Änderungen bzw. einfache Verschiebungen zu höheren oder niedrigeren Werten im Energieverbrauch. Bei den im Programm benutzten Daten (s. Anhang A9) zur Beschreibung der Umgebungsbedingungen, also Strahlung und Temperaturverlauf, handelt es sich um einen Schönwettertag. Die Annahmen zur Berücksichtigung von unkontrolliert ausgetauschten Luftmengen, im weiteren Verlauf als Leckluft bzw. Leckage bezeichnet, sind im Anhang A14 dargestellt.

7.2.2 Vorgehensweise und Programmablauf

Um die Programme und deren Ablauf übersichtlich gestalten zu können, wurde ein Programmpaket entwickelt. Das bedeutet, verschiedene Teilprobleme bzw. -systeme werden durch voneinander unabhängige Programme beschrieben. Verknüpft sind die Programme durch die von ihnen erzeugten bzw. benötigten Daten, die in ihrer Struktur identisch sind. Zudem sind Unterprogramme bzw. Procedures in der gewählten Programmiersprache Turbo-Pascal /56/ durch einfache Befehle universell verwendbar. Als getrennte Systeme wurden aufgefaßt:

- Trockner und Trocknungsverlauf
- erzeugte Qualität
- solarer Lufterhitzer

7.2.2.1 Programmteil Trockner und Trocknungsverlauf

Das dargestellte bzw. berechnete System des Trockners ist in Abbildung 7.1 dargestellt:

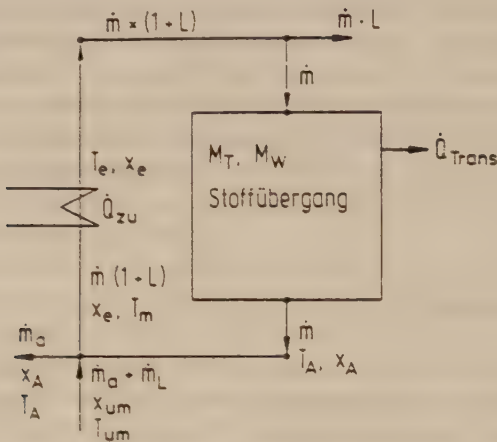


Abb. 7.1: Schematische Darstellung des Trockners¹

Das Simulationsprogramm berechnet je nach Vorgabe die Trocknereingangszustände entweder auf Basis eines vorgegeben Startfeldes oder nach einer veränderlichen Funktion für Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Alle übrigen Parameter wie Trockengewicht, Reife, Blattstand, Luftgeschwindigkeit, Leckrate des Trockners usw. werden in einem Eingangsfeld im Programm vorgegeben. Der Berechnungsteil iteriert die Luftzustände im Trockner, da mit den Mittelwerten von Ein- und Austritt der Stoffübergang berechnet wird, der Stoffübergang aber gleichzeitig von Zustandsgrößen abhängig ist.

¹ Zum Berechnungsgang siehe auch A10, A11

Ebenso kontrolliert das Programm den Trocknungsverlauf hinsichtlich der Vergilbungsdauer, da zum Ende dieses Vorganges in einigen Fällen wegen der Qualitätsvorgaben ein geänderter Trocknungsverlauf notwendig wird. Ausgegeben werden pro Zeitschritt der Energieverbrauch, Trocknungsgeschwindigkeit, Stoffübergangswiderstand, Luftaustauschmenge, spez. Transmissionswärmeverluste (bezogen auf die Tabakmenge), Trocknungsverlauf. Die Daten werden in einer Datei gespeichert und können mit weiteren Programmen, die die Einhaltung der in Kapitel 5 gemachten Qualitätsanforderungen und die Substitutionsmöglichkeiten von Solarenergie berechnen, gelesen werden. Im Ablaufdiagramm (Abbildung 7.2 s. nächste Seite) werden die Programmstruktur und Vorgehensweise verdeutlicht.

7.2.2.2 Programmteil Qualitätsüberprüfung

Das Programm "Quality" liest die mit dem Trocknungssimulationsprogramm erzeugten Datensätze und vergleicht den Trocknungsverlauf, die Zustandsgrößen der Trocknungsluft mit den in Kapitel 5. dargestellten Daten. Da die Qualitätsminderungen sowohl zeitabhängige als auch trockenungsverlaufabhängige Größen sind, werden Qualitätsminderungsfaktoren für verschiedene Minderungsgründe hochgezählt. Überschreitet einer der Minderungsfaktoren einen gesetzten Grenzwert, so wird dies in einem Protokoll vermerkt. Die Entscheidung, ob ein Trocknungsverlauf den Qualitätsanforderungen noch genügt, wird nicht vom Rechner getroffen, da dazu eine derart große Datenmenge bezüglich des Trocknungsverlaufes notwendig wäre, daß es eines nicht vertretbaren Programmieraufwandes bedürfte, diese computergerecht aufzubereiten und einzugeben. Der Programmablauf ist in der folgenden Abbildung 7.3 (s. Seite 62) dargestellt.

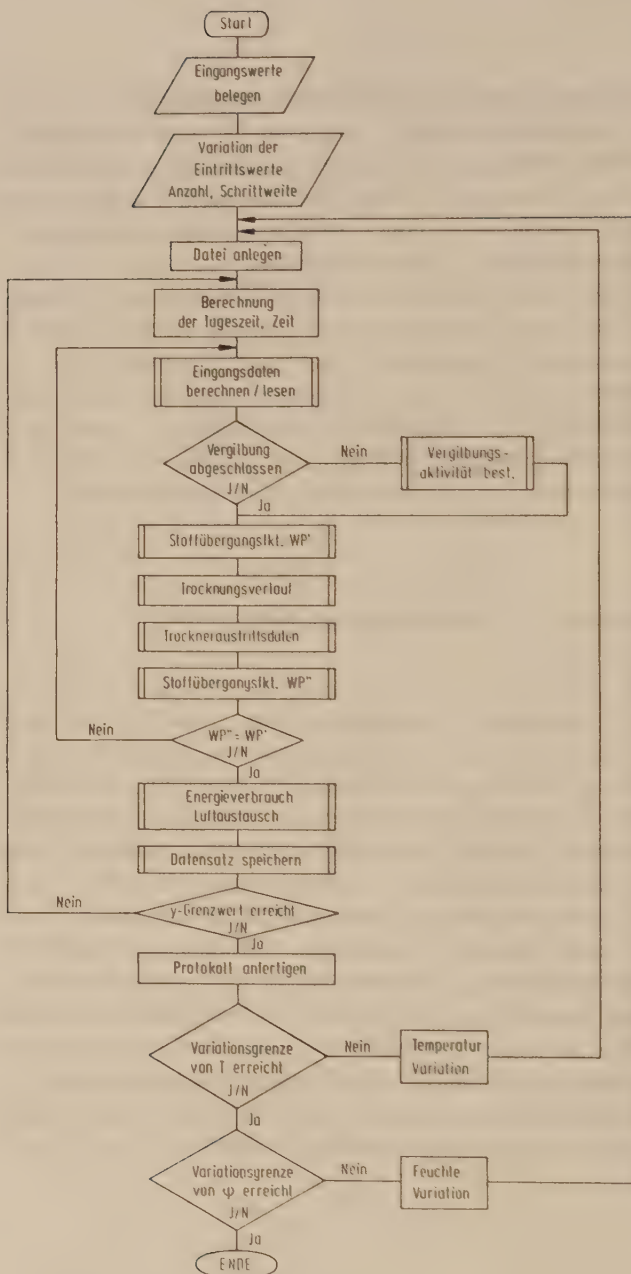


Abb.7.2: Ablaufdiagramm des Programnteils Trockner und Trocknungsverlauf

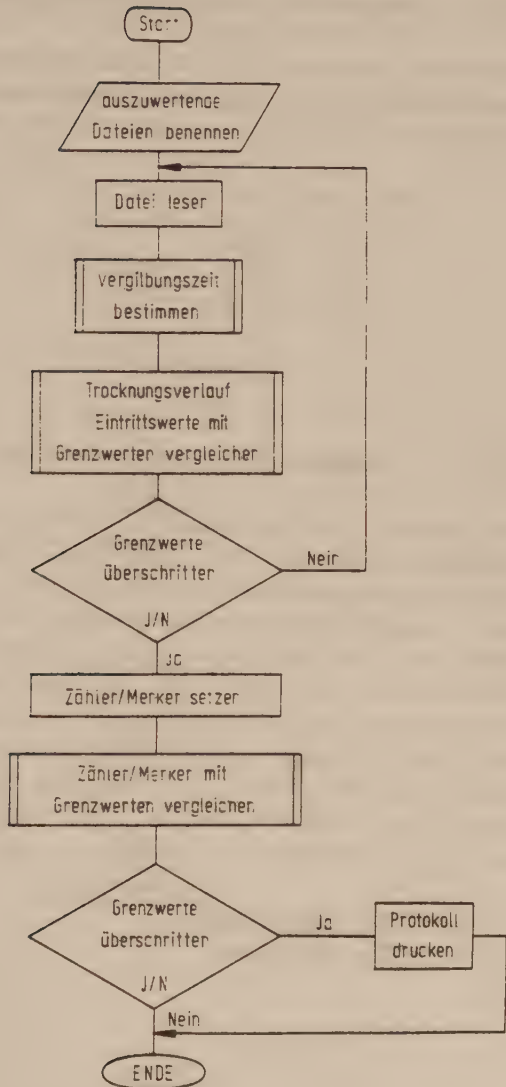


Abb. 7.3: Programmablauf der Qualitätsüberprüfung

7.2.2.3 Programmteil Solarer Lufterhitzer

Der solare Lufterhitzer wurde als ein Anlagenteil aufgefaßt, das den für den Trockner berechneten Energiebedarf zu decken versucht.

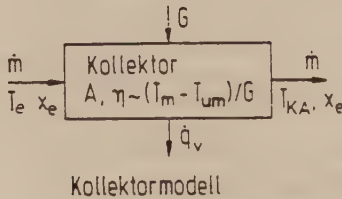


Abb. 7.4: Schematisiertes Kollektormodell^{1,2}

Das heißt, die Luftausgangszustände am Trockner sind die Eingangsgrößen für den Kollektor. Dieser wird durch eine Wirkungsgradgleichung, die von der Eintrittstemperatur sowie den Umgebungsbedingungen abhängig ist, beschrieben. Mit Kenntnis des augenblicklichen Wirkungsgrades wird die Nutzleistung bestimmt, aus der sich dann mit Kenntnis des Massenstromes die Austrittstemperatur des Kollektors berechnen läßt. Diese wird mit der Trocknereintrittstemperatur verglichen und je nach Vorzeichen der Temperaturdifferenz die zusätzlich erforderliche bzw. die überschüssige Energiemenge bestimmt. Veränderliche Faktoren im Programm sind:

1. Wirkungsgradverlauf
2. Kollektorfläche.

 1 siehe auch Anhang A12

2 Zur Behandlung des Problems "Überschüssige Energie" siehe Anhang
 A13 "Speicherberechnung mit nach dem NTU-Modell"

Anzumerken ist jedoch, daß die Kollektorfläche auch durch den Massenstrom beeinflusst wird /57/, da ein Kollektor für einen Massenstrom ausgelegt wird und nur eine bestimmte Bandbreite von Abweichungen vom Auslegungspunkt ohne Wirkungsgradverluste möglich sind. Der Massenstrom im Kollektor wird durch den Massenstrom des Trockners festgelegt.

Den Berechnungsgang als Flußdiagramm zeigt Abbildung 7.5.

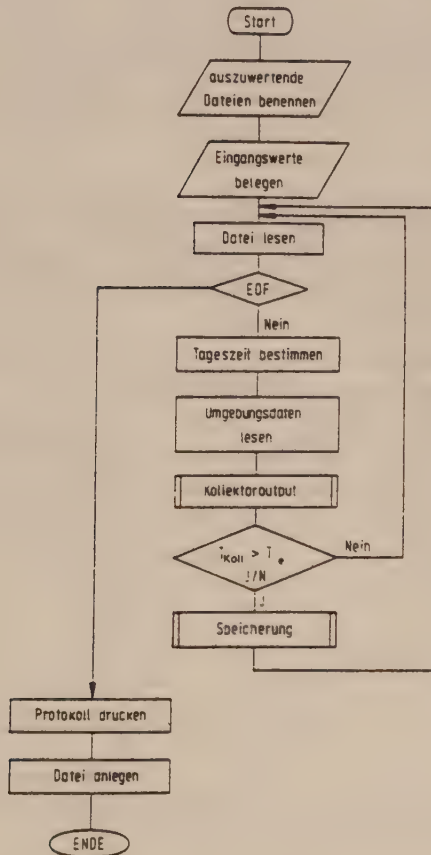


Abb.7.5: Flußdiagramm des Programmteils Solarer
Lufterhitzer

7.3 Verifizierung des Simulationsprogrammes - Validation

7.3.1 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Meßwerten Vertrauenstest

Zur Überprüfung der Simulationsrechnungen, d.h. zur Gewährleistung der Gültigkeit des Computermodelles wurde ein Trocknungsverlauf mit den aufgezeichneten Luftzuständen im Trocknereintritt eines Trocknungsversuches berechnet. Die Daten, die als Eingangsgrößen dieses Vertrauens-tests Verwendung fanden, sind im Anhang A15 dargestellt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen im Vergleich mit den Originaldaten zeigt die Abbildung 7.6.

Durch das Qualitätsüberprüfungsprogramm¹ wurden keine Beeinträchtigungen der Qualität ausgewiesen. Die Qualität des Versuchstabaks wurde von der Landesanstalt für Tabakforschung /58/ mit gut bewertet.

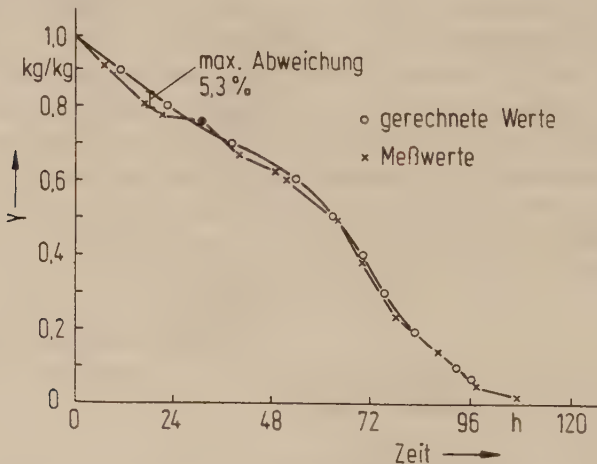


Abb. 7.6: Berechneter und gemessener Trocknungsverlauf
(Eintrittsdaten s. Anhang A12)

¹ Anzumerken ist, daß das Qualitätsüberprüfungsprogramm die Qualität selbst nicht berechnet, sondern nur Qualitätsminderungen

7.3.2 Beeinflussung der Rechnungen durch den Massenstrom im Trockner

Das in Kap. 6 dargestellte Stoffübergangsmodell ist, da es die äußeren Stoffübergangswiderstände wegen ihrer im Vergleich zu den inneren Widerständen zu vernachlässigenden Größenordnung unberücksichtigt läßt, vollkommen unabhängig vom Massenstrom. Dies widerspricht natürlich physikalischen Grundsätzen, da zum einen aus einer Wasserbilanz über den Trockner leicht ersichtlich ist, daß bei Sättigung das Modell fehlerhafte Ergebnisse liefert. Fehlerhaft insofern, als daß ein hygroskopisches Trockengut Feuchte der Trocknungsluft aufnimmt (s. Kap. 5.4.3.2). Zum anderen wächst bei gegen null strebenden Luftgeschwindigkeiten der äußere Stoffübergangswiderstand ins Unendliche. Das Modell setzt somit einen bestimmten Massenstrom und eine bestimmte Geometrie bzw. Anordnung des Trockengutes voraus. Das Modell läßt sich also auch über den Massenstrom überprüfen, da es ab einer bestimmten Größe des Massenstromes nicht mehr auf diesen Einfluß reagieren dürfte. Dieser Einfluß wurde in Abbildung 7.7 für einen Hochtemperaturzyklus berechnet. Die Abbildung gibt außerdem den minimalen Massenstrom wieder. Für kleinere Werte berechnet das Computermodell zwar eine plausible Verlängerung des Trocknungsvorganges, jedoch läßt sich dies nicht durch experimentelle Ergebnisse belegen.

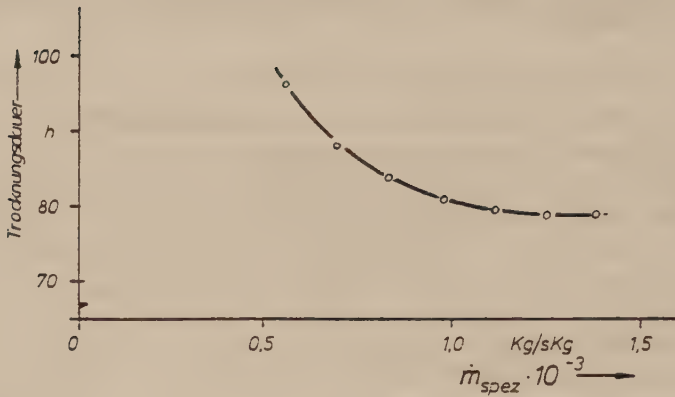


Abb. 7.7: Beeinflussung des Trocknungsverlaufes durch den Massenstrom, berechnet mit dem Simulationsprogramm "Trockner und Trocknungsverlauf" durch Variation des Massenstromes im Trockner

7.3.3 Diskussion der Verifizierungsrechnungen

Der Vergleich der gerechneten und der gemessenen Kurve in Abbildung 7.6 zeigt eine maximale Abweichung des Trocknungsverlaufes von 5,3 % während der Vergilbungsphase. Nach Kap. 6 weist das Wärme- und Stoffübergangsmodell zu Beginn und zum Ende des Trocknungsvorganges den größten Fehler¹ auf, auf den die hier dargestellte systematische Abweichung¹ während der Vergilbungsphase zurückgeführt werden kann. Dieser Fehler wirkt sich auch auf die Dauer der Vergilbungsphase aus, so daß auch hier von einem Fehler von 5 % ausgegangen werden muß. Auf den gesamten Prozeß bezogen ist die Abweichung jedoch als vernachlässigbar anzusehen, zumal der Einfluß auf den Energieverbrauch, der maßgeblich durch die Steigung der Kurve beeinflusst wird, in Zeiten des höchsten Energiebedarfes kaum erkennbar ist.

¹ Der in Abb.7.6 mit ● gekennzeichnet Wert ist auf Meßfehler zurückzuführen.

7.4 Einfluß geänderter Trocknungsparameter auf den Energieverbrauch

Die folgenden Simulationsrechnungen wurden mit dem Ziel, den Untersuchungsbereich für die Gesamtoptimierung (Kap.8) abzugrenzen, analog den unterschiedlichen Trocknungsphasen, also der Vergilbung, der Farbfixierung und der Blatttrocknung sowie der Rippentrocknung durchgeführt. Der Grund für diese Einteilung der Rechenabschnitte ist mit dem unterschiedlichen Temperatur- und Feuchteniveau und dem voneinander abweichenden Energiebedarf der einzelnen Phasen zu begründen.

7.4.1 Der Einfluß des Eintrittszustandes der Luft auf den Energieverbrauch der verschiedenen Trocknungsphasen

Ausgehend von einem Niedrigtemperaturzyklus, vergleichbar dem Standardzyklus /10/, bzw. dem von König /59/ veröffentlichten Zyklus, wurde der Energieverbrauch jeder einzelnen Trocknungsphase berechnet und die Temperatur von Berechnungsgang (Lauf) zu Berechnungsgang gesteigert. Innerhalb jedes einzelnen Berechnungsganges wurde zusätzlich auch die relative Luftfeuchtigkeit systematisch variiert. Die Ergebnisse für die Vergilbungsphase sind in Abbildung 7.8 dargestellt. Aufgetragen ist dort über einer dimensionslosen Temperatur der spezifische Wärmebedarf. Die Abszissenwerte berechnen sich darin aus der mittleren Temperatur während des Berechnungsabschnittes, normiert mit der mittleren Temperatur der gleichen Trocknungsphase eines Niedrigtemperaturzyklusses. Der spezifische Energiebedarf berechnet sich wie folgt:

$$Q_{\text{spez}} = \int_0^{t_v} \frac{\dot{Q}_{\text{Bed}}}{(Y_{t=0} - Y) * M_T * (1 - M_{tr})} dt \quad (7.1)$$

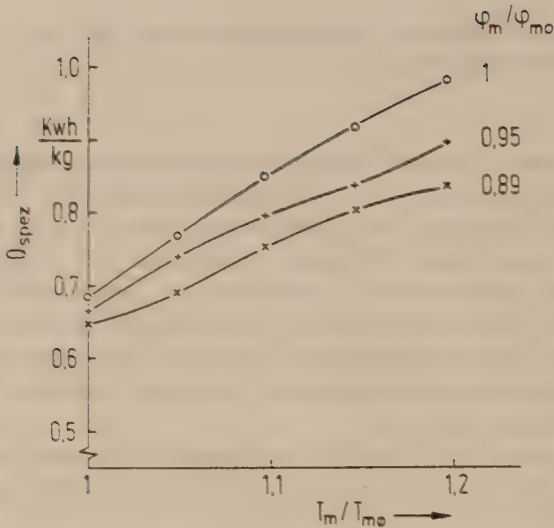


Abb. 7.6: Spezifischer Energieverbrauch während der Vergilbungsphase, aufgetragen über der dimensionlosen mittleren Temperatur ($T_m = 30.8^\circ \text{C}$, $\phi_{m0} = 82.4\%$) (mittlere Temperatur u. ϕ_{m0} Feuchte, bezogen auf die des Niedrigtemperaturzyklusses)

Für unterschiedliche relative Luftfeuchtigkeiten ergibt sich die dargestellte Kurvenschar. Der spezifische Energieverbrauch während der Vergilbung steigt demnach sowohl durch Erhöhen der Temperatur als auch durch Erhöhen der relativen Luftfeuchtigkeit. Diese Aussage steht in Widerspruch zu den fundamentalen Erkenntnissen von Mollier, dargestellt in Kapitel 4, wonach der Trocknungsprozeß bei höheren Temperaturen und erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit im Trockner energetisch günstiger verläuft.

Die Steigerung des berechneten spezifischen Energieverbrauches kann deshalb nur durch Größen beeinflusst sein, die im h, x -Diagramm bzw. in der Definition des spezifischen Energiebedarfes nach Gl. 4.3 nicht berücksichtigt werden, wie sie sich durch die Erfassung von Verlusten im Trockner ergeben. Als wesentliche beeinflussende Größen müssen die Leckluft-

und Transmissionsverluste im Trockner (zur Behandlung des Leckluftproblems siehe Anhang A14) angesehen werden, die einen starken Anstieg des Energieverbrauches bewirken und in den durchgeführten Rechnungen Berücksichtigung fanden. Die Leckluft geht demzufolge auf ihrem höchsten Temperaturniveau verloren, das heißt vor einer Berührung mit dem Trockengut; nur durch Verkürzung der Trocknungszeiten und die energetisch günstiger verlaufende Trocknung verringern sich die Steigerungsraten bei erhöhten Temperaturen. Die Transmissionsverluste haben wegen der geringen Temperaturdifferenz zur Umgebung (maximal 20 K) nur einen untergeordneten Einfluß.

Der Einfluß der Verluste wird deutlicher, wenn die zweite und dritte Trocknungsphase, die Blatt- und Rippentrocknung betrachtet wird. Für diese Phasen wurde auch eine Variation der Leckluftstraten vorgenommen und deren Einfluß auf den spezifischen Energiebedarf berechnet.

Ausgegangen wurde bei diesen Berechnungen von einem Trocknungsverlauf bis zu der jeweiligen Phase, der dem des Standardzyklusses entspricht (Wassergehalt $Y = 0,65$ im Falle der Blatttrocknung; $Y = 0,25$ bei der Rippentrocknung). Die Ergebnisse der Berechnungen für die Blatttrocknung zeigt die folgende Abbildung 7.9. Wieder ergeben sich, wie bereits während der Vergilbung, Steigerungen des spezifischen Energieverbrauches bei einer Temperaturerhöhung. Eine Absenkung der relativen Feuchte läßt den Anstieg geringer ausfallen. Die Unterschiede im Vergleich mit der Vergilbungsphase sind jedoch gravierender. Die Transmissionsverluste wurden in Abhängigkeit der Umgebungsdaten berechnet. Sie lagen in ihrer Größenordnung weit unter den übrigen Energiemengen (2-3% vom Gesamtenergiebedarf. Den Einfluß der Leckluftverluste zeigt die Abbildung 7.10. Die Bezeichnung dieser Luftmengen als reine Verluste ist nicht exakt, da sie den notwendigen Luftaustausch reduzieren. Da sie jedoch nicht am Trocknungsprozeß "teilnehmen" und unter trocknungstechnischen Gesichtspunkten ihr größtes Trocknungspotential zu dem Zeitpunkt besitzen, zu dem sie verloren gehen, erhöhen sie den Energieverbrauch

erheblich, wie Abbildung 7.10 veranschaulicht.

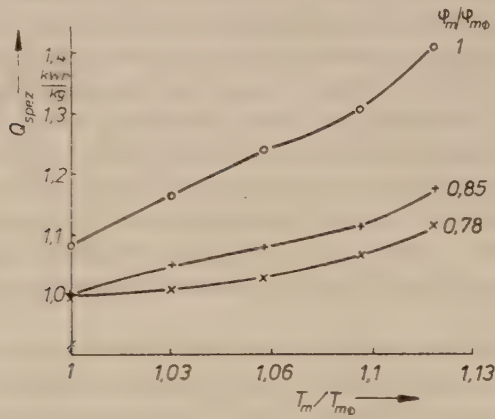


Abb. 7.9: Spezifischer Energieverbrauch bei der Blatttrocknung in Abhängigkeit des Temperaturniveaus und der relativen Luftfeuchtigkeit ($T_{m0} = 51.15^\circ C$, $\varphi_{m0} = 54.2\%$) (mittlere Temperatur u. Feuchte, bezogen auf die des Niedrigtemperaturzyklusses)

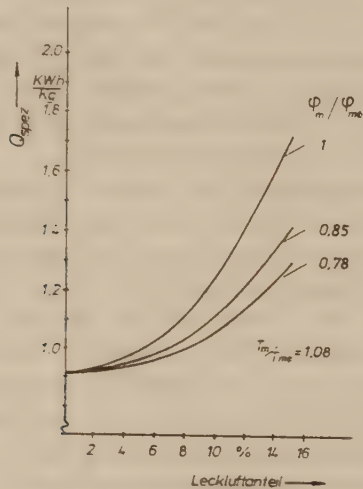


Abb. 7.10: Einfluß des Leckluftanteiles auf den spezifischen Energieverbrauch

Im Falle des nicht vorhandenen Leckluftanteiles stimmt der spezifische Energiebedarf mit dem, der sich dem h, x -Diagramm entnehmen ließe, weitgehend überein; in diesem Falle steigt dieser auch mit Erniedrigung der relativen Luftfeuchtigkeit an. Bei höheren Falschlufteanteilen gewinnt der Einfluß der relativen Luftfeuchtigkeit jedoch stark an Bedeutung. Dies ist darauf zurückzuführen, daß zum einen mit Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit auch der Enthalpiegehalt der Luft abnimmt, zum anderen aber auch die Dauer der Trocknung verkürzt wird. Diese Tatsache legt Prozeßveränderungen zur Reduktion des Energiebedarfes bei festgestellten Leckagen nahe (siehe dazu auch Kap.8 Optimierung der Betriebsweise).

Den Einfluß von Leckluftrate und geänderten Prozeßparametern auf den spezifischen Energiebedarf während der Rippentrocknung zeigt die folgende Abbildung 7.11.

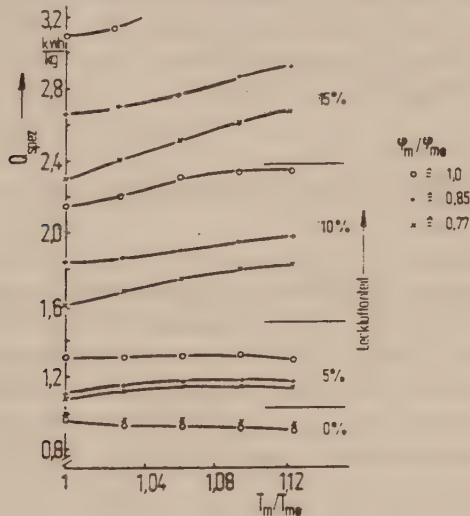


Abb. 7.11: Spezifischer Energieverbrauch während der Rippentrocknung, aufgetragen über der dimensionslosen Mitteltemperatur ($T_{m0} = 63.2^\circ \text{C}$, $\varphi_{m0} = 33.2\%$) (mittlere Temperatur u. Feuchte, bezogen auf die des Niedrigtemperaturzyklusses; zusätzlicher Parameter: Leckluftanteil)

Der Einfluß von Temperaturerhöhungen auf den spezifischen Energieverbrauch ist deutlich geringer als während der vorangegangenen Phasen. Wegen des hohen Trocknungstemperaturniveaus haben Temperaturerhöhungen eine überproportionale Vergrößerung der Dampfdruckdifferenz zwischen Trockengut und Trocknungsluft zur Folge, was einen entsprechend erhöhten Stoffübergang und damit eine Verkürzung der Trocknungszeiten bewirkt. Ohne Falschlufmengen ergibt sich qualitativ der aus dem Mollierdiagramm ermittelbare spezifische Energiebedarf. Eine niedrigere relative Luftfeuchtigkeit senkt wie bei der Blatttrocknung den Enthalpiegehalt der Falschlufmengen und führt zu einer Erhöhung des Stoffüberganges, was den Prozeß verkürzt und somit zusätzlich günstiger verlaufen läßt. Der im Vergleich mit den vorangegangenen Phasen stärkere Einfluß der relativen Luftfeuchte auf den spezifischen Energiebedarf ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß der Enthalpiegehalt der Luft bei konstanter Temperatur durch den Wassergehalt bestimmt wird und lineare Änderungen der relativen Feuchte bei einem höheren Temperaturniveau eine überproportionale Änderung des Wassergehaltes bewirkt.

7.4.2 Konsequenzen für eine Prozeßoptimierung

In allen Phasen der Trocknung ergaben sich erhöhte spezifische Energiemengen aufgrund vorausgesetzter Falschlufmengen, die durch Erniedrigung der relativen Luftfeuchtigkeit abgemildert werden können. Mit Ausnahme der Rippentrocknung wurde der Energiebedarf durch eine Steigerung der Temperatur ebenfalls merklich erhöht, so daß als Optimierungsbasis folgende Punkte Berücksichtigung finden sollten:

1. Verkürzung der Vergilbung, damit zu Beginn der Blatttrocknung Solarenergie verfügbar ist.
2. Erhöhung der Luftaustauschraten (Erniedrigung der relativen Feuchte) während der folgenden Phasen
3. Reduktion der Temperatur

Neben energetischen Gesichtspunkten ist durch diese Maßnahmen, insbesondere Punkt 2, eine verbesserte Farbfixierung zu erwarten, welche eine der kritischsten Phasen der Trocknung ist. Die Absenkung der Temperatur führt zu einer erhöhten Solarenergienutzung.

8. Veränderung des Trocknungsprozesses zur Optimierung der Solarenergienutzung

8.1 Optimierungsvoraussetzungen

Auf Basis der in Kap. 7 gewonnenen Erkenntnisse über den Trocknungsverlauf und den zugehörigen Energieverbrauch wurden systematische Untersuchungen am Gesamtzyklus vorgenommen und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem berechnet. Ziel der Variationen war die Minimierung der nicht durch Solarenergie abdeckbaren Energieanteile (konventionelle Energieträger). Als Voraussetzung für die Berechnungen wurden angenommen:

1. Die Vergilbungsphase muß konventionell, d.h. ohne Solarenergie durchgeführt werden
2. Die Vergilbungsphase ist so zu steuern, daß sie zu Beginn der hellen Tagesstunden endet

Als Ursache für die 1. Annahme sind die Luftverluste lufttechnischer Anlagen zu sehen /60/. Wegen der Luftverluste des Trockners /46/ kann der Trocknungsprozeß keine weiteren unkontrollierten Luftverluste verkraften, die eine Absenkung der relativen Feuchte der Trocknungsluft bewirken und damit die Qualität beeinträchtigen.

Annahme 2 ist durch die Ernte- und Trocknungspraxis bedingt, nach der der Beginn eines normalen Trocknungszyklusses am frühen Nachmittag liegt. Bei einer Gesamttrocknungszeit von 120 Stunden, mit einer Vergilbungszeit von ca. 50 Stunden verbleiben für eine direkte Nutzung einer Solaranlage maximal 28 Stunden, jede Verkürzung der Vergilbungszeit (bis zu 6 Stunden) bedeutet direkt eine Verlängerung der Nutzungszeit der Solaranlage.

8.2 Optimierung des Gesamtzyklusses

Ausgehend von den vorgegebenen Zyklen, dargestellt in Kap. 3.1, wurde eine Variation der Parameter Temperatur und Luftfeuchtigkeit für jeden Trocknungszyklus vorgenommen. Der Variationsbereich wurde durch die Ergebnisse von Kap. 7.4 und die qualitätsbestimmenden Faktoren vorgegeben. Mit diesen Berechnungen und den in Kap. 8.1 gemachten Annahmen konnte eine Vorauswahl für die eigentliche Optimierung, d.h. der Zyklus, der energetisch und für die Nutzung von Solarenergie die besten Voraussetzungen bietet, ermittelt werden.

Den Einfluß der Prozeßparameter Lufttemperatur und -feuchte auf den Energieverbrauch und die direkt nutzbare Solarenergie für den Zyklus nach Jaffre /13/,¹ der für die genannten Anforderungen und auch hinsichtlich der Qualität die günstigsten Eingangsvoraussetzungen besaß, zeigen die Abbildungen 8.1a,b. Dargestellt sind die Auswirkungen auf den spezifischen Energieverbrauch und die durch Solarenergie abdeckbaren Energieanteile in Abhängigkeit von Abweichungen von dem in Abbildung 3.2 gezeigten Temperatur- und Feuchteverlauf.²

Deutlich wird, daß die Tendenzen, die sich in der Untersuchung der einzelnen Trocknungsabschnitte widerspiegeln, hier nur sehr abgeschwächt bemerkbar sind. Als Ursache kommen zum einen die sich ändernden Anfangsbedingungen der Blatt- und Rippentrocknung in Betracht, zum anderen nivellieren sich die Änderungen, da die einzelnen Phasen keinen gleichen Energiebedarf haben und auch die Wasserabgabe nicht zeitlich konstant, bzw. für alle Phasen identisch ist. So ergibt sich zum Beispiel in Kap. 7.4 für die Rippentrocknung ein sehr hoher spezifischer Energiebedarf, da der abgeführte Wassermassenstrom sehr gering ist, in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf beträgt der Energiebedarf der Rippentrocknung jedoch nur ca. 30%.

¹ modifiziert zur Verkürzung der Vergilbungsphase

² Die berechneten solaren Deckungsraten beziehen sich auf die in Tabelle 7.1 dargestellten Vorgaben. Die Kollektorfläche wurde aufgrund einer Überschlagsrechnung vorgegeben und stellt kein Optimum dar. In jedem Falle handelt es sich jedoch um die maximale Nutzungsmöglichkeit solarer Strahlung, da die Kollektorfläche als überdimensioniert angenommen wurde.

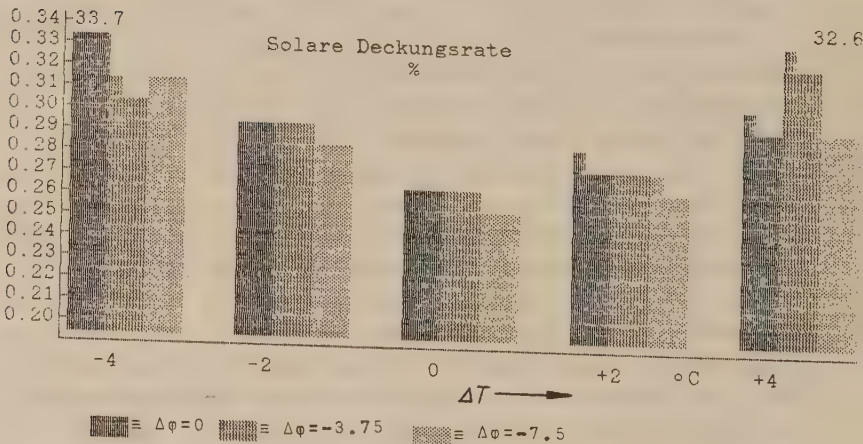
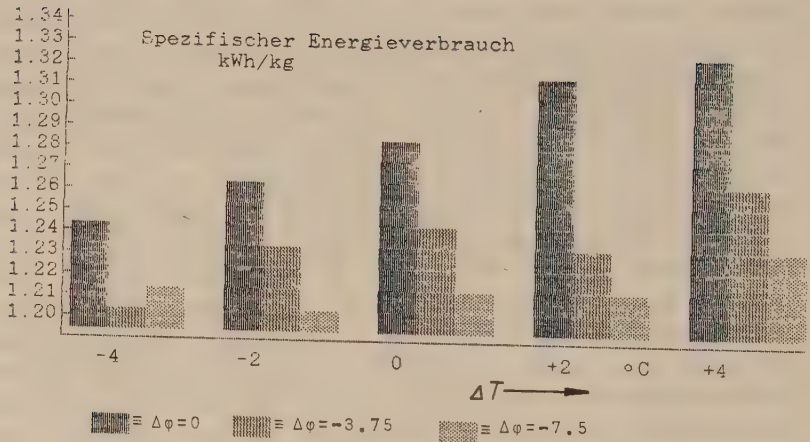


Abb. 8.1a,b: Spezifischer Energieverbrauch (a) und Anteil der Solarenergie (b) am Gesamtzyklus in Abhängigkeit von Abweichungen der Temperatur und Luftfeuchte von dem von Jaffre /13/ vorgeschlagenen Zyklus

Ausgehend von den in Abbildung 8.1 dargestellten Ergebnissen wurde eine systematische Variation von zeitlich begrenzten Änderungen (bis zu 12 Stunden) der Temperatur und der relativen Feuchte innerhalb des Zyklusses vorgenommen. Es ergab sich ein gravierender Unterschied bezüglich der Solarenergienutzung, wenn der Trocknungsprozeß mit nächtlichen Temperaturabsenkungen durchgeführt wird.^{1,2} Die Solarenergienutzung kann durch nächtliche Temperaturabsenkungen um über 33% gesteigert werden. Zwar steigt auch der spezifische Energieverbrauch, wird jedoch durch die erhöhte Solarenergienutzung mehr als kompensiert. Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über die Nutzungsmöglichkeit von Solarenergie und spezifischen Energieverbrauch bei einem optimierten Prozeß mit und ohne nächtliche Temperaturabsenkung und zeigt als Vergleich den konventionellen Zyklus /13/.

<u>Optimierter Zyklus /13/</u>	<u>Temperaturabsenkung</u>	
	<u>mit nächtlicher</u>	<u>ohne</u>
spezifischer Energieverbrauch	1.377	1.244 kWh/kg
Solare Deckungsrate	45.1	33.7 %
<u>konventioneller Zyklus</u>		
spezifischer Energieverbrauch		1.287 kWh/kg
Solare Deckungsrate		26.7 %

Tabelle 8.1: Vergleich von Energieverbrauch und Solarenergienutzung bei Zyklen mit und ohne nächtliche Temperaturabsenkung

Anhand von Abbildung 8.2 läßt sich auch zeigen, warum der Prozeß mit nächtlichen Temperaturabsenkungen die günstigste Prozeßführung ist. Dargestellt sind der Energiebedarf und die Energiebereitstellung der Kollektoranlage während des Prozesses. Die Spitzen des Energieverbrauches werden durch den Energiestrom der Solaranlage voll abgedeckt und während der Nachtphasen sind aufgrund von zu befürchtenden Qualitätminierungen keine weiteren Verringerungen des Energieverbrauches möglich.

¹ Zur Beeinflussung der Qualität siehe Kap. 5.4

² Dabei wird mit nachlassender Strahlung (s. Anhang A8) ab 18 Uhr die Temperatur in Abhängigkeit der Trocknungsdauer abgesenkt, beginnend mit 2 K pro Stunde mit steigender Tendenz bis ein Grenzwert erreicht wird (siehe auch Abb. 8.3).

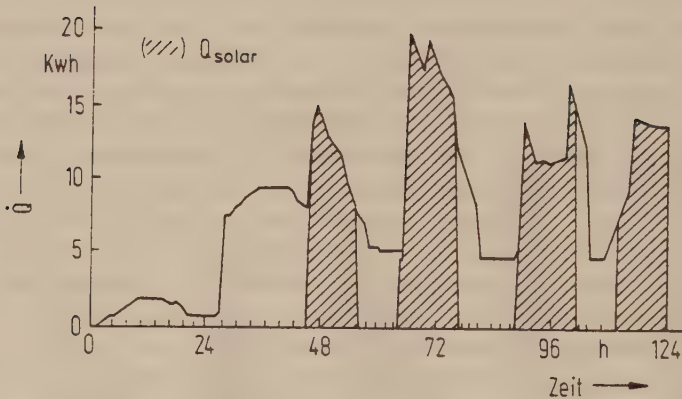


Abb. 8.2: Energiebedarf aufgetragen über der Zyklusdauer;
schraffiert: Energiestrom von der Solaranlage

Die Luftzustände zur Durchführung eines Trocknungsprozesses mit nächtlichen Temperaturabsenkungen zeigt die folgende Abbildung 8.3.

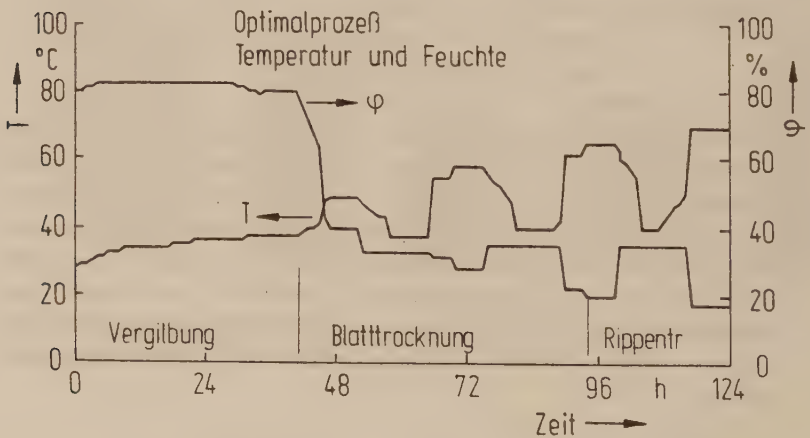


Abb. 8.3: Prozessvorgaben für einen Trocknungsprozeß mit
nächtlichen Temperaturabsenkungen

8.3 Beeinflussung der Optimierung durch die Kollektoranlage

Wird eine Kollektoranlage mit einer bestimmten Wirkungsgradcharakteristik vorgegeben, so hat dies in gewissen Grenzen Auswirkungen auf die Optimierung des Prozesses selbst. Auswirkungen insofern, da versucht werden muß, den zeitlichen Verlauf des Energiebedarfes mit dem der Energielieferung der Kollektoranlage zur Deckung zu bringen. Auswirkungen auf den Prozeß ergeben sich jedoch nur bei unterdimensionierten Kollektoranlagen, da im Falle einer Überdimensionierung nur durch eine Erhöhung des Energieverbrauches in den hellen Tagestunden eine verbesserte direkte Nutzung der Solaranlage möglich ist. Dies führt jedoch in der Regel zu einer Verkürzung des Prozesses. Die Nutzungszeiten der Kollektoranlage werden damit unter Umständen reduziert und die Erhöhung der Solarenergieemenge wird durch einen erhöhten Energieverbrauch kompensiert, so daß kein positiver Effekt erzielt werden kann.

Die Auswirkungen einer unterdimensionierten Kollektoranlage auf die Optimierung wurde für zwei Fälle durchgeführt. Ausgangspunkt für die Optimierung war der in Kap.8.2 dargestellte Prozeß.

8.3.1 Bestimmung der optimalen Kollektorfeldgröße

Eine Optimierung der Kollektorfläche wurde nach energetischen Kriterien durchgeführt (s.auch Kap 2). Die für den vorgegebenen Prozeß ohne Zwischenspeicherung nutzbare Energiemenge in Abhängigkeit der Kollektorfläche zeigt Abbildung 8.4. Als die energetisch optimale Kollektorfläche ergibt sich die Fläche, die einen Energiestrom erzeugt, der zu keinem Zeitpunkt den Energiebedarf des Trockners wesentlich übersteigt. Abbildung 8.4 zeigt auch die überschüssigen Energiemengen in Abhängigkeit der Kollektorfläche. Danach werden als die optimale Kollektorfläche für den berechneten Prozeß 51 m² pro Tonne Frischtabak veranschlagt.

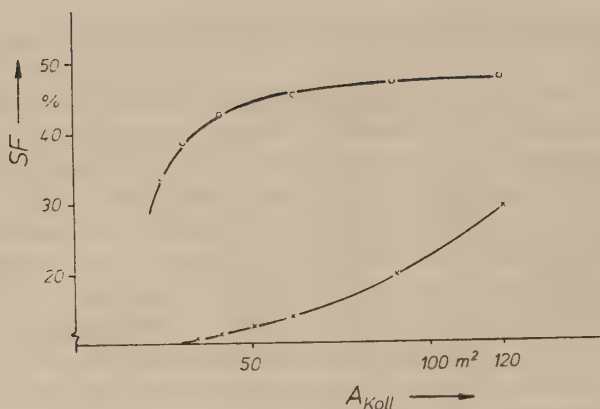


Abb.8.4: Anteil der Solarenergie am Gesamtenergieverbrauch (o), nicht direkt nutzbare Solarenergie (x), in Abhängigkeit von der Kollektorfläche

8.3.2 Auswirkungen der Kollektorfeldgröße und der Wirkungsgradcharakteristik auf die Prozeßoptimierung

Die Prozeßoptimierung, wie in Kap. 8.2 dargestellt, wurde für den Fall einer Unterdimensionierung des Kollektorfeldes von 15 % und von 34 % untersucht. Grundsätzlich ist die Vorgehensweise identisch bei einem Kollektor mit stärkerem Abfall der Wirkungsgradkennlinie (Reduktion des Energiestromes der Kollektoranlage). Als Ergebnis ergibt sich in beiden Fällen eine leichte Modifikation des gefundenen Optimalprozesses hin zu niedrigerem Energieverbrauch während der Nutzungszeiten der Solaranlage.

Für den Fall der 15 %igen Reduktion der Fläche sollte die relative Feuchte der Luft bei sonst identischem Prozeß leicht gesenkt werden, und zwar um 2.5 %. Für den berechneten Fall, daß die Fläche nur 2/3 der optimalen beträgt, muß die relative Feuchte um 6 % gesenkt werden. Die solare Deckungsrate kann durch diese Modifikation gegenüber der in Abbildung 8.4 dargestellten Werte bis zu 4 % gesteigert werden.

Eine Veränderung der Kollektorkennlinie bedeutet ebenfalls, daß der Prozeß in seinem Temperaturverlauf modifiziert werden muß, da der Kollektor mit veränderten Wirkungsgraden arbeitet. Für diese Untersuchung wurde die Kollektorkennlinie einer existierenden Tabaktrocknungsanlage /61/ benutzt, die bei höheren Temperaturdifferenzen einem stärkeren Wirkungsgradabfall aufweist. Als Resultat ergeben sich jedoch nur geringfügige Abweichungen von dem in Kap 8.2 optimierten Prozeß. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Energieverbrauch gegenüber Veränderungen des Prozesses sensibler reagiert als die Kollektoranlage, wie sich aus den Steigungen der Kollektorkennlinie und den Diagrammen in Kap 7.3 über den spezifischen Energieverbrauch ablesen läßt.

Für den untersuchten Kollektor ergab sich als optimaler Prozeß ein Trocknungszyklus, der während der hellen Tagesstunden in der Temperatur um 1.5°C und in der rel. Feuchte um 3.5 % reduziert ist. Die solare Deckungsrate sinkt jedoch trotz 15 %iger Erhöhung der Kollektorfläche auf 41% ab.

8.4 Auswirkungen der Prozeßoptimierung auf den Aufbau und den Betrieb einer solaren Trocknungsanlage

Der Aufbau einer solaren Tabaktrocknungsanlage ist gekennzeichnet durch die Komponenten Trockner, Kollektorfeld, Wärmespeicher, Umluft- und Kontrollsystem und zusätzlichen, vom Solarsystem unabhängigen, Wärmeerzeugern. Insbesondere der Wärmespeicher ist dabei eine Komponente, die zwar zur Erzielung einer hohen solaren Deckungsrate unumgänglich ist, aber zum einen deutlich erhöhte Investitionskosten durch zusätzliche Steuerungs- und Versorgungseinrichtungen erfordert, zum anderen jedoch auch oftmals hohe Verluste aufweist /46/,/61/. Der Einsatz eines Wärmespeichers hat aus diesen Gründen auch Einfluß auf die Prozeßoptimierung, sei es, daß dadurch ein anderer Prozeß notwendig wird, oder daß ein Wärmespeicher überflüssig wird.

Die Verbesserungen des in Kap 8.2 optimierten Prozesses beruhen im wesentlichen auf einer Verkürzung der Vergilbungsphase und einer Prozeßänderung durch die Zeiten mit hohem Energiebedarf in die Nutzungszeiten der Solaranlage verschoben werden. Eine Anpassung des Prozesses an eine Kollektoranlage mit einem Speicher, der während des Tages durch die Solaranlage geladen wird, kann nur in einer Reduktion des nächtlichen Energiebedarfes und des Prozeßtemperaturniveaus liegen. Diese Werte sind aber bereits in Kap.8.2 gerade in dieser Hinsicht optimiert worden und stoßen sowohl im Blick auf die Qualitätsanforderungen als auch energetisch an ihre Grenzen, so daß der Prozeß für eine Integration eines Speichers in die Kollektoranlage nicht modifiziert werden muß.

Die Notwendigkeit eines Speichers wird jedoch durch die Prozeßänderungen verringert, da der nächtliche Energiebedarf gegenüber dem Prozeß nach Jaffre /13/ reduziert wird. Der durch den Wärmespeicher abdeckbare Energieanteil beträgt nun noch maximal 30 % vom Gesamtenergiebedarf. Eine Aussage über den Einsatz kann nur eine Amortisationsrechnung geben, jedoch legen die Betriebserfahrungen aus /61/ einen Verzicht nahe,

was den Aufbau und den Betrieb einer solaren Trocknungsanlage stark vereinfacht. Neben den entfallenden Komponenten kann auch die Kollektorfläche verringert werden, da keine Speicherverluste auftreten.

9. Zusammenfassung

Die Trocknung landwirtschaftlicher Produkte ist seit jeher ein Verfahren, das mit der Nutzung von Solarenergie in Zusammenhang steht und sich mit dem Stichwort "traditionelle Boden- bzw. Felddrocknung" umschreiben läßt. Diese Trocknungsverfahren wurden und werden auch bei der Tabakherstellung angewandt. Mit gestiegenem Gesundheitsbewußtsein jedoch und dem daraus resultierenden Wunsch nach sogenannten leichten, hellen Tabaken wurde diese Tradition bei der Tabaktrocknung gebrochen, weil diese "einfachen Trocknungsverfahren" für diese Tabake nicht geeignet sind. Der Grund liegt in den während der Trocknung ablaufenden chemischen Prozessen, die durch die Trocknungsführung beeinflußt werden und dem Tabak sein Aroma und seinen Geschmack geben. Aus diesem Grunde wird Virginia-Tabak, der wichtigste und am meisten produzierte der hellen Tabake, nach einem festliegenden Prozeß getrocknet, der bisher fast ausschließlich in industriellen Anlagen durchgeführt wurde. Da diese Art der Trocknung sehr energieintensiv ist und die tabakproduzierenden Länder klimatisch sehr günstige Bedingungen für eine Solarenergienutzung besitzen, ist es nur konsequent, diese auch wieder auf diesem Gebiet anzuwenden.

Die Schwierigkeiten der Solarenergienutzung bei der Tabaktrocknung liegen vor allem im vorgegebenen Prozeß, der zum einen auf einem ungünstigen, weil hohem Temperaturniveau stattfindet, was wegen des mit steigender Temperatur sinkenden Wirkungsgrades von Solarkollektoren zu großen Kollektorfeldern führt. Zum anderen hat dieser Prozeß einen permanenten Energiebedarf, der mit der Energielieferung des Kollektors, die von der wechselnden Sonneneinstrahlung abhängig ist, nicht in Übereinstimmung steht. Als Folge daraus muß für den nächtlichen Betrieb, um den Prozeß einhalten zu können, Wärme zwischengespeichert werden, was wegen der dabei auftretenden Verluste zu einer Vergrößerung der notwendigen Kollektorflächen führt. Aus diesen Gründen wurde in dieser Arbeit nicht an einer Verbesserung der solaren Anlagenteile gearbeitet.

tet, sondern der Prozeß selbst untersucht. Insbesondere wurden die Grenzwerte der Prozeßführung für eine Beeinträchtigung der Tabakqualität ermittelt, um einen größeren Spielraum beim Betrieb einer Solaranlage zu haben und somit über Prozeßänderungen eine Erhöhung der nutzbaren solaren Strahlung zu erzielen.

Die Schwierigkeiten der Untersuchungen bestanden in der kurzen Verfügbarkeit von Tabak während eines Jahres (4-5 Wochen), was die Zahl der Versuchsreihen auf 3-4 pro Jahr beschränkte, und in der Tatsache, daß Tabak ein Naturprodukt ist, das einer Vielzahl von Einflußgrößen ausgesetzt ist, die das Wachstum, die Inhaltsstoffe, die ablaufenden chemischen Prozesse wie auch die Trocknung beeinflussen. Dies erforderte eine parallele Versuchsdurchführung von vergleichenden Versuchen.

Mit den experimentellen Untersuchungen wurden die Grenzwerte für Prozeßmodifikationen, die sich durch eine Beeinträchtigung der Produktqualität ergeben, ermittelt und gleichzeitig die Wärme- und Stoffübergangsvorgänge analysiert, um dann über Simulationsrechnungen den Prozeß so zu optimieren, daß durch Substitution mit Solarenergie der Bedarf an konventionellen Energieträgern minimiert wird.

Innerhalb der Grenzwerte, die sich durch die qualitätsbeeinflussenden Faktoren, wie zeitlicher Verlauf des Temperaturniveaus und der Trocknungsgeschwindigkeit ergeben, konnte ein Wärme- und Stoffübergangsmodell gebildet werden, das mit hinreichender Genauigkeit die Möglichkeit zur Berechnung des Trocknungsprozesses gibt. Mit diesem Modell wurden eine Parametervariation durchgeführt und die Nutzungsmöglichkeiten solarer Strahlung in Abhängigkeit des Trocknungsprozesses ermittelt.

Durch Prozeßmodifikation konnte so eine Verbesserung der Nutzungsmöglichkeiten solarer Strahlung gefunden werden, die durch eine Verschiebung einzelner Trocknungsphasen in Zeiten

mit möglicher Solarenergienutzung den Anteil der Solarenergie am Gesamtenergieverbrauch von 26.7 % beim vorgegebenen Prozeß auf 45.1 % erhöht. Dieser Prozeß wurde in einem Experiment hinsichtlich der erzeugten Qualität überprüft. Die tabakverarbeitende Industrie bestätigte nach chemischen Analysen die erzeugte gute Qualität.

Bezüglich des Aufbaus einer solaren Trocknungsanlage ergeben sich durch diesen Prozeß zusätzliche Vorteile, die in der Erniedrigung des nächtlichen Energiebedarfes liegen, so daß die Größe eines Wärmespeichers reduziert werden kann. Da nun nur noch 30 % des Energiebedarfes durch einen Wärmespeicher gedeckt werden können, muß anhand wirtschaftlicher Kriterien dessen Notwendigkeit geprüft werden. Der Aufbau einer solaren Trocknungsanlage ohne Wärmespeicher würde zudem zusätzliche Vereinfachungen im Anlagenbetrieb bedingen.

Literatur

- /1/ Akehurst, B.C.;: Tobacco.
Longman New York, 1981².
- /2/ Bender, F.E.; et al.: Solar Energy, Applications in
Agriculture Potential, Research Needs and Adop-
tion Strategies, III. Application of solar Energy to Ta-
bacco Curing, Agricultural Experiment Station; Universi-
ty of Maryland, 61, 1976.
- /3/ Bericht über den 6. CORESTA-Kongreß in Wien 1984,
Der Deutsche Tabakbau, 49, 65, 1985
- /4/ Entwicklungsländer-Arbeitsgespräch v. 26/27.8.1985
Simonskall/ Eifel.
Ergebnisprotokoll, PLE, Jülich 1985
- /5/ Lazi, F: Tabak/ Kenia
Globus-Sendung 20.10.85, WDR 1985
- /6/ Seibert, T.; Hechler, G.: Tabakbau in Deutschland.
Pfälzische Verlagsanstalt Neustadt, Landau, 1976
- /7/ Walker, E.K.: Fixing the color of flue-cured tobacco
under forced air conditions.
Tob. Sci., 9, 91-7, 1965
- /8/ Bolst, K.: Simulation und Wirtschaftlichkeit von Luft-
kollektor-Speicher-Systemen zur solarunterstützten
Trocknung am Beispiel des Tabaks.
Dissertation, Bochum, 1983
- /9/ Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin:
"TRNSYS", A transient system simulation program.
University of Wisconsin, Madison 1983

- /10/ Landesanstalt für Pflanzenbau und Tabakforschung Forch-
heim: Tätigkeitsbericht 1978/79, 34, 1980
- /11/ Maltry, W.; Pötke, E.; Schneider, B.: Landwirtschaftli-
che Trocknungstechnik.
VEB Verlag Technik, Berlin 1975²
- /12/ Saravia, L.; Alanis, E.; Frigerio, E.; de Paul, I.:
Solar tobacco dryer.
UNSA, Solar Energy Group, 1978
- /13/ Jaffre, R.: Ernte, Trocknung und Aufbereitung von
Virginia Tabak.
Der Deutsche Tabakbau, 65, 126-131, 1985
- /14/ Chang, C.S.; Johnson, W.H.: Moisture and weight distri-
bution in bright leaf tobacco.
Tob.Sci., 19, 131-4, 1975
- /15/ Nordenskjöld, R.: Konvektive Trocknung des Einzelteils
einiger botanischer Produkte.
Dissertation, München, 1975
- /16/ Henson Jr, W.H.; Johnson, W.H.; Hassler, F.J.: The
influence of leaf maturity and other factors on the
drying rate of bright leaf tobacco.
Tob. Sci., 20, 121-5, 1976
- /17/ Bacon, C.W.; Wenger, R.; Bullock, J.F.: Chemical
changes in tobacco during flue curing.
Ind. Eng. Chem., 792, 44, 1952
- /18/ Mohapatra, S.C.; Johnson, W.H.: Mikroskopie studies of
bright leaf tobacco. I. Conventionally cured vs freeze
dried curing.
Tob. Sci., 17, 33, 1972

- /19/ Wegmann, K.; Kitzmann, K.; Schmidt, J.A.: Biochemical Aspects of Tobacco Curing.
Vortrag Coresta-Kongreß, Wien, 1984
- /20/ Kitzmann, K.: Persönliche Mitteilung.
Tübingen 1985
- /21/ Walker, E.K.: Some chemical characteristics of cured leaves of flue-cured tobacco relative to time of harvest, stalk position and chlorophyll content of the green leaves.
Tob. Sci., 12, 58-65, 1968
- /22/ Range, P.: Bulk-Trocknung im deutschen Virgin-Anbau aus der Sicht des Tabak-Wissenschaftlers.
Der Deutsche Tabakbau, 58.5, 54-6, 1978
- /23/ Badische Tabakmanufaktur Roth-Händle GmbH & Co., Lahr: Richtlinien zur Erzeugung von Qualitätstabak in Verbindung mit den Rohtabak-Anbau- und Liefervertrag für heißluftgetrockneten Tabak. März 1978
- /24/ Badische Tabakmanufaktur Roth-Händle GmbH & Co, Lahr: Rohtabakanbau- und Liefervertrag für heißluftgetrocknete Tabake. März 1979
- /25/ Orbeck, K.: Bisherige Erfahrungen mit dem neuen Bulk-Trocknungsverfahren für Virgin Tabake.
Der Deutsche Tabakbau, 58.5, 57-8, 1978
- /26/ Krischer, O.; Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Bd. 1,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978³
- /27/ Mollier, R.: Ein neues Diagramm für Dampf Luftgemische.
Z.VDI, 67, 869-872, 1923

- /28/ Mollier, R.: Das i, x- Diagramm für Dampfluftgemische.
Z.VDI, 73, 1009-1013, 1929
- /29/ Duffie, J.A.; Beckman, W.A.: Sonnenenergie: Thermische Prozesse.
München, 1976
- /30/ Duffie, J.A.; Beckman, W.A.: Solar engineering of thermal processes.
J. Wiley & Sons New York, 1980
- /31/ Bundesverband Solarenergie BSE: Richtlinien und Hinweise für die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit von Solarkollektoren . A. Wirkungsgradtest von Solarkollektoren.
Bundesverband Solarenergie, Essen, 1979
- /32/ Altfeld, K.: Exergetische Optimierung flacher Luftherhitzer.
VDI-Verlag Düsseldorf, 1985
- /33/ Altfeld, K.; Leiner, W.; Fiebig, M.: Exergetische Optimierung flacher Luftherhitzer.
HLK, 36, 68-72, 1985
- /34/ ASHRAE-Standard 93-77: Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors.
American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, (ASHRAE), 345 East 47th Street, New York 10017, 1977
- /35/ Brandt, P.: Auslegung, Konstruktion und Instrumentierung eines Trocknungssimulators zur Trocknung von Virginia und von Burley Tabaken.
Konstruktiver Entwurf, Institut für Thermo- und Fluid-dynamik, Ruhr-Universität Bochum, 1984

- /36/ Zwink, E.: Auslegung, Konstruktion und Instrumentierung eines Trocknungssimulators zur Trocknung von Virginia und von Burley Tabaken.
Konstruktiver Entwurf, Institut für Thermo- und Fluid-dynamik, Ruhr-Universität Bochum, 1983
- /37/ Wiechers, A.: Experimentelle Optimierung der Strömungsverhältnisse in einer Trocknungskammer durch Einbauten. Studienarbeit, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Ruhr-Universität Bochum, 1984
- /38/ Kitzmann, K.: Persönliche Mitteilung.
Tübingen 1983
- /39/ Tanaka, L.: Chlorophyllase of rye.
J. Biochemistry, 92, 1763-1773, 1982
- /40/ Biondi, P.; Farina, G.: Senkung der Erzeugungskosten von Virginia-Bright durch Mechanisierung.
Der Deutsche Tabakbau, 65, 121-126, 1985
Org:L`Informatore Agrario, Verona 1985
- /41/ Brauer, H.: Stoffaustausch.
Verlag Sauerländer Arrau, 201, 1971
- /42/ Moss, E.G.; Teter, N.C.: Bright leaf tobacco curing.
North Carolina State Coll., Agr. Expt. Sta. Bull.
346, 1944
- /43/ Hassler, F.J.: Leaf temperature measurement in tobacco curing research.
Tob. Sci., 1, 64-7, 1957
- /44/ Adam, A.: Virginianbau - ein drittes Bein für den Tabakanbau?.
Der Deutsche Tabakbau, 64.6, 61-2, 1984

- /45/ ROTAK, Rohtabakvergärungs AG, Karlsruhe: Persönliche Mitteilung.
Karlsruhe 1985
- /46/ Barthel, H.; et al.: Optimierung einer solaren Tabak-Trocknungsanlage in Argentinien.
BMFT-Statusbericht 1984: Technologien zur Energieeinsparung in der Landwirtschaft. Hrsg.: Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, S. 58-73, 1984.
- /47/ Peck, R.E.; Wasan, D.T.: Adv. Chem. Eng. 9, 247/293 1974
- /48/ Passamai, V.; Morhenne, J.; Leiner, W.; Fiebig, M.: Empirische Stoffübergangsfunktion für die Heißluft-trocknung von Virginia-Tabak.
Chem.-Ing.-Tech., 56, 775-777, 1984
- /49/ Brandt, P.: Rechnerische Auswertung von Trocknungsversuchen - Analyse und Simulation des Trocknungsverlaufes. Diplomarbeit, Institut Thermo- und Fluidodynamik, Ruhr-Universität Bochum, 1984
- /50/ Walker, E.K.: Correlations among physical characteristics and between physical and chemical characteristics in cured leaves of flue-cured tobacco harvested at different stages of maturity.
Tob. Sci., 12, 86-92, 1968
- /51/ Bell, K.J.; et al: Heat Exchanger Design Handbook, Vol3: Thermal and Hydraulic Design of Heat Exchanger, Kap.3.7.5. Hemisphere Publishing Corporation, Washington 1980
- /52/ Cundiff, J.S.: Effect of exchange air rate on energy efficiency in tobacco curing.
ASAE, Wintermeeting Chicago 1980

- /53/ SCS Technical Committee on Model Credibility:
Terminology for Model Credibility.
Simulations, 32, 103f, 1979

- /54/ Bolst, K.; Morhenne, J.; Fiebig M.: Computersimulation
of a solar tobacco drying plant in northern Argentinie.
Proc. 1.EC-Conference on Solar Heating, Amsterdam 1984

- /55/ Fiebig, M.; Steinkemper W.: Auslegung einer 30t Tabak-
trocknungsanlage. Statusbericht Sonnenenergie I
VDI-Verlag Düsseldorf, 541-553, 1980

- /56/ Heimsoth Software, Hrsg.: Turbo-Pascal Version 3.0.
München 1985

- /57/ Leiner, W.; Altfeld, K.: Forschungsbericht Thermische
Nutzung von Luftkollektoren und ihren Komponenten auf
einem Indoor Versuchsstand.
Insitut Thermo- Fluidodynamik, Ruhr-Universität Bochum
1986

- /58/ König, G.: Qualitätsuntersuchungen an Proben von Virgin-
Tabaken.
Landesanstalt für Tabakforschung Rheinstetten, 1984

- /59/ König, G.: Virgintrocknung mit der Bulk-Curing Anlage.
Der Deutsche Tabakbau, 65, 259-262, 1985

- /60/ Brethouwer, D.E.: The performance of air cooled
collector systems in Dutch field tests.
Proc. 1.EC-Conference on Solar Heating, 76-82,
Amsterdam 1984

- /61/ Morhenne, J.; Fiebig, M.; Brockmeyer, U.; Leipertz, A.;
Leiner, W.: Betriebserfahrungen mit einer 20 t Tabak-
trocknungsanlage.
Proc. 5. Sonnenforum, 1161-1165, Berlin 1984

- /62/ Bolton, J.R.; Archer, M.D.: Chemical Conversion and Storage of Solar Energy - an Overview.
Proc. Intersol 1985, Montreal 1985

- /63/ Elliot, J.M.: The Effect of Topping Flue-Cured Tobacco on Certain Properties of Cured Leaves and Smoke Characteristics of Cigarettes.
Tob. Sci., 19, 7-9, 1975

- /64/ Wagner, W.: Eine mathematisch statistische Methode zum Aufstellen thermodynamischer Gleichungen - gezeigt am Beispiel der Dampfdruckgleichung reiner fluider Stoffe.
Habilitationsschrift, TU Braunschweig 1973

- /65/ Pollak, R.; Wagner, W.: Eine rationelle Dampfdruckgleichung für Wasser .
Thermodynamik Kolloquium des VDI, Aachen 1975

- /66/ Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas.
VDI Verlag Düsseldorf, 1984⁴

- /67/ Hughes, P.M.; Klein, S.A.; Close, D.J.: Packed Bed Thermal Storage Models for Solar Air Heating and Cooling systems.
Journal of Heat Transfer, 5, 1976

- /68/ Schumann, T.E.W.: A liquid flowing through a porous prism.
J. Franklin Inst, 208, 405-416, 1929

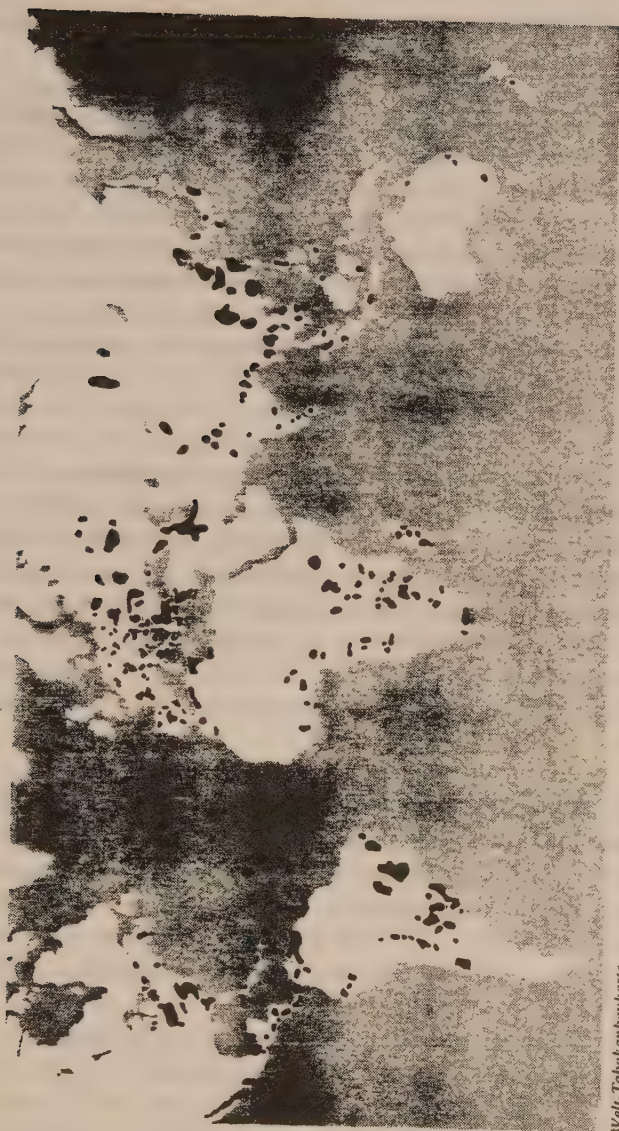
- /69/ Coutier, J.P.; Farber, E.A.: Two Applications of a Numerical Approach of Heat Transfer Process within Rockbeds.
Solar Energy, 29, 451-462, 1982

- /70/ Löf, G.O.G.; Hawley, R.W.: Unsteady State Heat Transfer between Air and Loose Solids.
Ind. Eng. Chem., 40, 1061, 1940

ANHANG

- A1 Tabakanbauländer
- A2 Der Tabak
- A3 Beschreibung der üblichen Ernteverfahren
- A4 Erntevoraussetzungen
- A5 Biochemische Reaktionen und Veränderungen der
 Inhaltsstoffe während der Trocknung
- A6 Versuchstrockner
- A7 Aufplatzen der Organellen
- A8 Umgebungsdaten
- A9 Beeinflussung des Trocknungsverlaufes durch den
 Massenstrom - Experimentelle Überprüfung
- A10 Berechnung der Luftzustände
- A11 Berechnung des Trockners und des Trocknungs-
 verlaufes
- A12 Berechnung des solaren Luftherhitzers
- A13 Berechnung eines Speichers nach dem NTU-Modell
- A14 Darstellung der Leckluftproblematik
- A15 Überprüfung der Programme mit Meßdaten

A1



Welt-Tabakbaukarte

Der Tabak

Tabak ist eine Pflanze aus der Familie der Solanceen, ein Nachtschattengewächs, das die größten Mengen Alkaloide aller vorkommenden Pflanzen besitzt und wegen seines Hauptalkaloides, Nikotin, schon sehr früh von einigen Naturvölkern in Amerika kultiviert wurde und von dort aus nach Europa gelangte. Zur Geschichte des Tabaks siehe Seibert und Hechler /6/.

Genutzt werden die Blätter der Pflanze, die meist blattweise gepflückt und anschließend getrocknet werden (siehe A3). Unter der botanischen Bezeichnung *Nicotiana Tabaccum* sind ca. 40 Arten zu unterscheiden; hier untersucht wird jedoch nur eine Art aus der Gruppe *Nicotiana Tabaccum* L auch als Typ Virginia bezeichnet, die Sorte trägt den Namen Aurea. Es handelt sich dabei um einen hellen Tabak von im getrocknetem Zustand orange-gelber bis hellgelber Färbung mit im Vergleich zu anderen Tabaken sehr hohem Zuckergehalt (die Inhaltsstoffe und deren Veränderungen sind im Anhang A5 "Chemische Reaktionen während der Trocknung" zu entnehmen; für weitergehende Beschreibungen über die Pflanze deren Wachstum, Samen, Anbau usw. siehe Akehurst /1/).

Die für den reinen Trocknungsvorgang relevanten Größen, also Dicke, Dichte, und Größe der zu trocknenden Blätter sind der Tabelle in Kap.3.2 zu entnehmen.

Beschreibung der üblichen Ernteverfahren

Bei dem angesprochenen Heißlufttrocknungsverfahren lassen sich drei wesentliche Arten unterscheiden, die einmal die Entwicklung dieser Verfahren als auch neuere Erntetechniken und Mechanisierungsverfahren widerspiegeln:

- (a) nach der traditionellen Art, die auch bei den dunklen Tabaken angewendet wird
- (b) das sogenannte bulk-curing
- (c) das mechanical-batch-curing

zu (a):

Bei diesem Verfahren, auch Ofentrocknung genannt, werden die Blätter in Schnüre eingenäht und diese in den Trocknungshäusern relativ dicht aufgehängt. Die Trocknungshäuser werden meist mit Holz- oder Kohlefeuerungen beheizt; die Wärmeübertragung geschieht durch freie Konvektion über die durch den Raum geführten Abgasleitungen.

zu (b):

Beim bulk-curing-Verfahren wird der Tabak auf sogenannte Racks, das sind Rahmen mit einer Reihe von Nadeln, sehr dicht gepackt aufgespießt in den Trockner eingebracht. Die Packungsdichte ist um den Faktor 5 - 10 größer als bei (a) und dieses Verfahren hat einen wesentlich geringeren Arbeitsbedarf zum Beschicken/Entladen der Trockner.

Die Trockner müssen jedoch mit Ventilatoren ausgerüstet sein, da keine freie Konvektion wegen der hohen Packungsdichte zustande kommt. Die Trockner werden wegen der guten Regelungsmöglichkeiten mit Öl- oder Gasbrennern beheizt und sind im Vergleich zu (a) wesentlich bedienungsfreundlicher. Es handelt sich im Vergleich zu (a) um ein sehr junges Verfah-

ren, das in Deutschland 1975 erstmals eingesetzt wurde /25/.

zu (c):

Das mechanical-batch-curing ist ein Verfahren, das auf dem bulk-curing-Verfahren aufbaut. Es handelt sich um einen Tunneltrockner, in den die mit Tabak behängten Racks im Durchlaufverfahren getrocknet werden. Dieser Trockner kann im Tagesrythmus beschickt werden, zudem sind die Investitionskosten niedriger, da im Falle (b) mehrere Trockner (üblich sind Dreiergruppen) notwendig sind.

Dieses Verfahren hat sich trotz der Vorteile bis jetzt jedoch noch nicht durchsetzen können.

Erntevoraussetzungen

Bei allen Trocknungsverfahren werden die Pflanzen blattweise geerntet. Der Erntezeitpunkt ist dabei im wesentlichen durch den Zustand der Pflanze bzw. der zu erntenden Blätter (es werden in der Regel 2-4 Blätter pro Erntestufe geerntet) bestimmt und zwar in der Weise, daß die während des Wachstums in der Pflanze stattfindenden Reifeprozesse, den Erntezeitpunkt und die Anzahl der zu erntenden Blätter festlegen. Die Reife der Blätter läßt sich mit einiger Erfahrung aus dem Aussehen (Färbung) bestimmen.

Die Ernte beginnt mit den unteren Blättern, da hier der Reifeprozess zuerst einsetzt. Der Reifeprozess ist ein Dessimilationsprozeß, d.h. die in den Blättern gespeicherten Nährstoffe werden abgebaut und an die oberen Blätter und die Blütenstände abgegeben.¹ Dabei werden die chemischen Umsetzungen, die während der Trocknung gewünscht sind eingeleitet. Sie sind unter anderem durch eine nachlassende Assimilation aufgrund von Abschattung durch die oberen Blätter bzw. nachlassende Strahlung bedingt. Die Erntestufe wirkt sich damit auch auf die Trocknung aus, da mit steigender Erntestufe sich auch die Blattgröße, Blattdicke und das Trockengewicht verändern. Die Trocknungszeit steigt mit zunehmender Erntestufe.

Ein wesentlicher Punkt für die erzeugte Produktqualität und auch für die Trocknung selbst ist die Reife der Blätter zum Zeitpunkt der Ernte. Zwar läßt sich die Qualität von zum falschen Zeitpunkt geerntete Blättern (über bzw. unreif) in gewissem Rahmen auch durch die Trocknung noch steigern, jedoch sind diesen Maßnahmen Grenzen gesetzt/16/. Die Trocknung selbst verlangsamt sich jedoch durch unreif geerntetes Material /46/, der Stoffübergangswiderstand ist bis zu einer Zehnerpotenz unterschiedlich /46/.

¹ Damit die Nährstoffe nur den Blättern zugute kommen, werden die Blütenstände entfernt (sog. Köpfen). Zum Einfluß des Köpfens siehe Elliot /63/.

Biochemische Reaktionen und Veränderung der Inhaltsstoffe während der Trocknung

Durch den Trocknungsprozeß hervorgerufene Änderungen der Tabakinhaltsstoffe nach /1/ :

Einteilung der Inhaltsstoffe:

- a) die statische Gruppe
- b) die Stickstoff-Gruppe
- c) die dynamische Gruppe

Tabelle A1 zeigt die wichtigsten Inhaltsstoffe von frischem Tabak.

	% vom Trockengewicht
statische Gruppe	42.5
Asche (anorg. Kat.-Anionen)	12.0
Rohfasern (Zellulose, Lignin)	10.0
Pentosan	2.0
Pektin	7.0
Wachs, Paraffin etc.	7.5
Polyphenole, Phenol-Säuren	2.0
Oxalsäure	2.0
Stickstoff-Gruppe	15.5
gesamter Stickstoff	2.7
Proteine	12.03
gelöster Stickstoff	0.67
Nitrate	0.189
Alkaloide	0.27
nicht identifiziert	0.135
Amine	0.054
Dynamische Gruppe	42.0
Kohlenhydrate (Poly-Monosaccharide)	23.0
Stärke, Dextrin)	
Ätherische org. Säuren	11.0
nicht identifiziert	8.0

Tab. A1 : Inhaltsstoffe von frischem Tabak (Zahlenangaben sind auf das Trockengewicht bezogen)/1/

Bei den heißluftgetrockneten Tabaken treten während der Trocknung kaum Veränderungen in der "statischen Gruppe" auf, die Veränderungen in der dynamischen Gruppe dagegen sind erheblich und sind auch stark abweichend von den luftgetrockneten Tabaken. Tabelle A2 zeigt die Inhaltsstoffe und deren Veränderung während der Trocknung von heißluftgetrocknetem Tabak.

Komponente	grün	gelb	getrocknet
Stärke	29.3	12.4	5.52
reduzierter Zucker	6.68	15.92	16.47
Levulose	2.87	7.06	7.06
Saccharose	1.73	5.22	7.30
Rohfasern	7.28	7.16	7.34
gesamter Stickstoff	1.08	1.04	1.05
Protein N	0.65	0.56	0.51
Nikotin	1.10	1.02	0.97
Asche	9.23	9.24	9.25
Calcium	1.37	1.37	1.37
Oxalsäure	0.96	0.92	0.85
Zitronensäure	0.40	0.37	0.38
Apfelsäure	8.62	9.85	8.73
Harze	7.05	6.53	6.61
Pektinsäure	10.99	10.22	8.48
pH-Wert	5.55	5.64	5.55

Tab. A2 : Veränderung in der Zusammensetzung von heißluftgetrocknetem Tabak während der Trocknung. /1/

Auch in der dynamischen Gruppe zeigen sich große Unterschiede zum luftgetrockneten Tabak, hier besonders in den Veränderungen der Kohlehydratanteile (Zucker). Der Stärkeaufschluß ist ähnlich, jedoch finden kaum Oxidationsprozesse statt. Der Zuckergehalt ist einer der wesentlichen Unterschiede.

Versuchstrockner

Einen Überblick über die Meß- und Regelungseinrichtungen der in Abb. 5.1 gezeigten Versuchstrockner gibt Tabelle A6.1:

	Regelungseinrichtung	Meßeinrichtung
Temperatur	HB - Digitric $0 < T < 75^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{ist}} = T_{\text{soll}} \pm 0,2 \text{ K}$	Pt - 100 $0 - 100^{\circ}\text{C}$ geeicht $\pm 0,1 \text{ K}$
Fauchte	Stäfa/Vaisalla $\varphi_{\text{mess}} = \varphi_{\text{soll}} \pm 2,5 \% \pm 1,0 \%$	Vaisalla $\pm 3 \% (80 - 90 \%)$ $\pm 2 \% (0 - 80 \%)$
Massenstrom	0 - 400 kg/h (stufenlos) Über Drehzahl- regler	Blenden nach DIN 1972 Einlauf 15 D Auslauf 7 D

Tab. A6.1: Meß- und Regeleinrichtung der Versuchstrockner

Die Meß- und Regeleinrichtung der Klimaschränke zeigt Tabelle A6.2

	Regeleinrichtung	Meßeinrichtung
Klimaschrank (Köttermann)		
Temperatur	$0 < T < 250^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,2\text{ K}$	Pt - 100 $\pm 0,1\text{ K}$
Feuchte	Taupunktbad $0 < T < 100^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,1^{\text{b}}\text{ K}$	Vaisalla $0 < \varphi < 100\%$ $\pm 3\%$
Massenstrom		einmalig bestimmt mit Heißleiteranemo- meter Alnor GG 65 Meßbereich: $0,01 - 4,9\text{ m/s} \pm 0,01\text{ m/s}$ $5 - 29\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$
Trockenschrank (Heraeus)		
Temperatur	$T < T < 200^{\circ}\text{C}$ $\pm 2,0$	Pt - 100 $\pm 0,1\text{ K}$
Feuchte	Luftaustausch mecha- nisch einstellbar	Vaisalla $0 < \varphi < 100\%$ $\pm 3,0\%$
Massenstrom		einmalig bestimmt mit Heißleiterane- moneter Alnor GG 65

Tab. A6.2: Meß- und Regelungseinrichtung der Klimaschränke

Aufplatzen der Organellen

Deutlich erkennbar ist der abnehmende Wasserverlust zum Ende der Vergilbung, dies spiegelt sich auch in Darstellung des Stoffübergangswiderstandes wider (Abbildung A7.1). Mit der Steigerung des Dampfdruckes steigt auch der Wasserverlust wieder an, was sich im abnehmenden Widerstand äußert. Zu diesem Zeitpunkt platzen die Organellen und Luftsaurestoff kann in die zerstörte Zellstruktur eindringen.

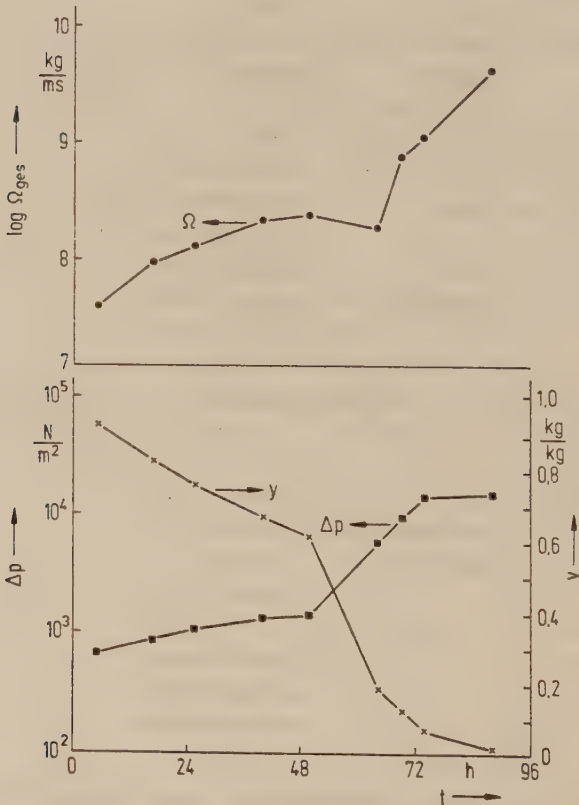


Abb.A7.1: Trocknungs-, Dampfdruck- und Stoffübergangswiderstandsverlauf von Virginatabak

Umgebungsdaten

Nachfolgende Tabelle enthält die Umgebungsdaten, die im Simulationsprogramm zur Berechnung der Transmissionsverluste des Trockners und zur Bestimmung der Nutzleistung des Kollektors benutzt wurden.

	T-Umgebung	Einstrahlung W/qm
0 Uhr	1.8800E+01	0.0000E+00
1 Uhr	1.8700E+01	0.0000E+00
2 Uhr	1.8600E+01	0.0000E+00
3 Uhr	1.8600E+01	0.0000E+00
4 Uhr	1.8600E+01	0.0000E+00
5 Uhr	1.8500E+01	0.0000E+00
6 Uhr	1.8500E+01	0.0000E+00
7 Uhr	1.8700E+01	5.5000E+01
8 Uhr	1.8900E+01	1.2500E+02
9 Uhr	1.9500E+01	3.7500E+02
10 Uhr	2.3000E+01	5.6500E+02
11 Uhr	2.5000E+01	7.8000E+02
12 Uhr	2.5900E+01	8.3000E+02
13 Uhr	2.6700E+01	9.0000E+02
14 Uhr	2.7500E+01	8.4000E+02
15 Uhr	2.8200E+01	7.9000E+02
16 Uhr	2.8300E+01	6.0000E+02
17 Uhr	2.8300E+01	4.7500E+02
18 Uhr	2.8100E+01	2.5000E+02
19 Uhr	2.7500E+01	1.5500E+02
20 Uhr	2.7300E+01	7.5000E+01
21 Uhr	2.6800E+01	2.5000E+01
22 Uhr	2.4400E+01	0.0000E+00
23 Uhr	2.2200E+01	0.0000E+00

Beeinflussung des Trocknungsverlaufes durch den Massenstrom Experimentelle Überprüfung

Die folgende Abbildung zeigt den Trocknungsverlauf zweier Versuche mit identischen Versuchsbedingungen; wobei der eine Trocknungsprozeß mit einem um den Faktor 3 niedrigerem Massenstrom durchgeführt wurde. Der in der Abbildung dargestellte Versuch mit der niedrigeren Trocknungsrate ist jedoch dem höheren Massenstrom zuzuordnen (Meßungenauigkeit), so daß kein Einfluß durch den Massenstrom nachgewiesen werden konnte.

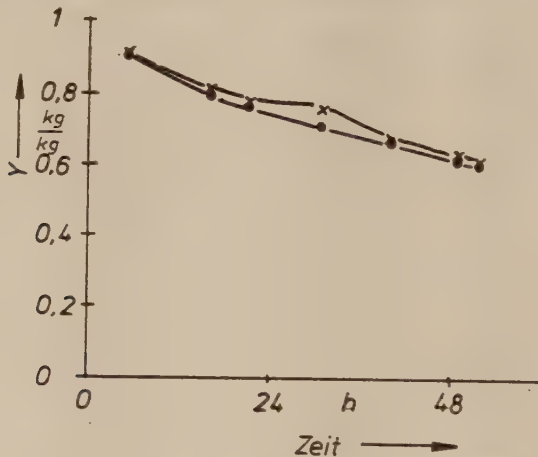


Abb.A8: Beeinflussung des Trocknungsverlaufes durch die Geschwindigkeit der Trocknungsluft, dargestellt am zeitlichen Verlauf des Wassergehaltes zweier sonst identischer Versuche

Berechnung der LuftzuständeBestimmung des Wassersättigungsdruckes nach Wagner /64/,/65/

$$P_S = P_K \cdot \exp\left(T_K^{-1} \cdot (n_1 \cdot \delta + n_2 \cdot \delta^{1.5} + n_3 \cdot \delta^{2.5} + n_4 \cdot \delta^{6.5} + n_5 \cdot \delta^{7.5})\right)$$

$$\delta = 1 - \frac{T}{T_K}$$

Koeffizienten: $n_1 = -7.8639$ $n_2 = 1.8985$ $n_3 = -2.3649$ $n_4 = -9.9114$ $n_5 = 9.9830$ $T_K = 647.25 \text{ K}$ $P_K = 221.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ Bestimmung der relativen Feuchte Phi und des Wassergehaltes X

$$X = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_S}{P_U - \varphi \cdot P_S}$$

Bestimmung des Enthalpiegehaltes der Luft

$$h_{1+x} = c_{P_L} \cdot T + X \cdot (c_{P_W} \cdot T + \Delta h_v)$$

Stoffwerte nach /66/

Bestimmung der Dichte der Luft

$$\rho = 348.52 * \frac{P}{T} - 1.318 * \varphi * \frac{P}{T}$$

Berechnung des Trockners und des Trocknungsverlaufes

Wasserverlust -abgabe des Trockengutes

$$\dot{m}_W = M_T * M_{tr} * (1 - \phi) * P_S / W_P$$

Bestimmung des Stoffübergangswiderstandes

$$W_P = W_P^0 + W_P^1 + W_P^2 + W_P^3 + W_P^4$$

$$W_P^0 = a_0 + a_1 * Y + a_2 * Y^2 + a_3 * Y^3 + a_4 * Y^4$$

$$\text{Koeffizienten: } a_0 = 8.80010$$

$$a_1 = -14.31378$$

$$a_2 = 39.48384$$

$$a_3 = -50.03799$$

$$a_4 = 21.62937$$

$$W_P^1 = W_P * 0.012 * \text{Reife} * Y^{0.8}$$

$$W_P^2 = W_P * M_{tr}^{1.3}$$

$$0.75$$

$$W_P^3 = W_P * \frac{\Delta T}{100} \quad \text{für } \Delta T > 0, \quad W_P^3 = 0 \quad \text{für } \Delta T < 0$$

$$\Delta T = 45 - T^{\circ}C$$

$$W_P^4 = W_P * 0.07 * \ln((Blst)^{0.2})$$

Da sowohl Y als auch W_P voneinander abhängig sind und zudem T_A über die mittlere Temperatur in den Widerstand eingeht, muß der gesamte Rechnungsgang für den Trocknungsverlauf

iterativ gelöst werden.

Für die iterative Bestimmung von W_P wurde eine Genauigkeitsgrenze 1 ‰ vorgegeben.

Bestimmung der Austrittsfeuchte und des Wassergehaltes der Luft

$$X_A = \dot{m}_W / \dot{m}_L + X_E$$

wenn $X_A > X_{\max}$ (Sättigung) dann Bestimmung von $\dot{m}_W$ aus der vorhergehenden Gleichung mit $X_A = X_{\max}$

Bestimmung des Wassergehaltes des Trockengutes

$$Y = \frac{M_T - M_{tr} * M_{T(t=0)}}{M_{T(t=0)} * (1 - M_{tr})}$$

Berechnung des Trockners

Bestimmung der Verluste

$$\dot{m}_L = \dot{m} * \text{Leckfaktor} \quad (= \text{Leckmassenstrom})$$

Energieverluste aufgrund von Leckverlusten

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L * (c_{P_L} * (T_E - T_U) + c_{P_W} * (X_E * T_E - X_U * T_U) + \Delta h_v * (X_E - X_U))$$

Einheit KJ/s

Energieverluste aufgrund von Transmissionswärmeverlusten

$$\dot{Q}_{\text{trans}} = K * (T_M - T_U) \text{ KJ/s m}^2$$

$$A = A_{\text{spez}} * M_T \text{ m}^2/\text{Kg}, A_{\text{spez}} = \text{Trockneroberfläche pro Kg}_T$$

Berechnung des Luftaustrittszustandes

Berechnung der Austrittstemperatur

Annahme: kapazitive Effekte sind vernachlässigbar (Trockner und Trockengut)

$$h_{1+x_E} = h_{1+x_A} + \dot{Q}_{\text{trans}} / \dot{m}$$

$$T_A = \frac{h_{1+x} - \dot{Q}_{\text{trans}} / \dot{m} - X_A * \Delta h_v}{c_{P_L} + X_A * c_{P_W}}$$

Berechnung des Energiebedarfes

Berechnung des Luftaustausches

Berechnet aus einer Wasserbilanz über den Trockner (luftseitig)

$$\dot{m}_{\text{aus}} = \dot{m} * \frac{X_E * (1+L) - L * X_U - X_A}{X_U - X_A}$$

Energiebedarf zur Deckung des Luftaustausches

Es wird die Energiemenge berechnet, die notwendig ist, um die eintretende Frischluft auf das Trockneraustrittstemperaturniveau zu bringen

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A * (c_{P,L} * (T_A - T_U) + c_{P,W} * (X_A * T_A - X_U * T_U)) + \Delta h_v * (X_A - X_U)$$

Berechnung des gesamten Energiebedarfes

$$\dot{Q} = \dot{m} * (1+L) * (h_{1+x,E} - h_{1+x,m})$$

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q} + \dot{Q}_A + \dot{Q}_{trans}$$

Mischungsenthalpie

$$h_{1+x,m} = \frac{\dot{m}_A * (h_{1+x,A} - L * h_{1+x,U}) - \dot{m}_U * (h_{1+x,A} - h_{1+x,U})}{\dot{m} * (1 + L)}$$

Berechnung des Solaren Lufterhitzers

Der Wirkungsgrad des Kollektors berechnet sich wie folgt:

$$\eta = F * (\tau\alpha - K * (\frac{T_E - T_U}{G}))$$

die Nutzleistung:

$$\dot{Q}_N = \eta * G * A_K$$

und die Austrittstemperatur:

$$T_A = \dot{Q}_N / (\dot{m} * c_p) + T_E$$

mit

F= Kollektorwirkungsgradfaktor

G= Globalstrahlung W/m^2

Die Werte, die in die Berechnung eingingen, sind der Tabelle 7.1 zu entnehmen.

$$A_K = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{spez}} = 60 \text{ m}^2$$

Berechnung eines Speichers nach dem NTU-Modell /67/

Zur Benutzung des NTU-Modelles siehe auch /68/.

Der Lösungsalgorithmus ist dem "TRNSYS"-Manual /9/ Kap 4.3.2 zu entnehmen.

Zur Bestimmung von NTU und des Wärmeüberganges siehe Coutier / 69/ sowie Löff /70/.

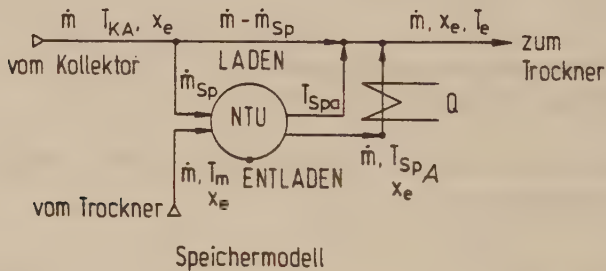


Abb.A13: schematische Darstellung der Betriebsweise eines Speichers

Darstellung der Leckluftproblematik

Die Betrachtung der Leckluftproblematik sei hier auf die im Betrieb eines Trockners auftretenden Leckluftströme beschränkt. Grundsätzlich lassen sich drei Fälle unterscheiden:

1. Der Trockner wird im Unterdruck betrieben (kein Vakuumtrockner)
2. Der gesamte Trockner steht unter einem Überdruck
3. Es herrscht sowohl Unter- als auch Überdruck an verschiedenen Orten im Trockner

Ausgehend von der Tatsache, daß sich lufttechnische Anlagen nie vollständig dichten lassen, ergeben sich für die angesprochenen Fälle unterschiedliche Auswirkungen auf den Betrieb eines Trockners. Im Falle 1 wird kühle Umgebungsluft in den Trockner gesaugt und senkt dort das Temperaturniveau. Der Luftaustausch findet am "falschen Ort" statt. Der Prozeß verschlechtert sich leicht (spez. Energiebedarf steigt).

Im Falle 2 ergeben sich gravierendere Konsequenzen, da Luftmengen verloren gehen, die zudem ein hohes Temperaturniveau besitzen und z.T. nicht am Trocknungsprozeß "teilgenommen" haben. Es handelt sich, wenn die Leckluftmengen nicht gesättigt sind, um reine Verluste.

Punkt 3 ist eine Kombination aus Fall 1 und 2. Im Falle 2 und 3 befindet sich der Ort mit dem höchsten im Trockner auftretenden Druck stets an der Trocknereintrittsseite, d.h. vor der Durchströmung des Trockners. Im dem den Berechnungen zugrundegelegten Fall wurde diese Art der Leckluftverluste berücksichtigt, d.h., daß die Trocknungsluft auf ihrem höchsten Temperaturniveau und mit der niedrigsten Luftfeuchte ausgeblasen wird. Diese Annahme leitet sich auch aus der Analyse eines existierenden Systems her /46/, /61/.

Zur Verdeutlichung der im Betrieb eines Trockners auftretenden Energie- und Massenströme siehe die folgende Abbildung A14.1.

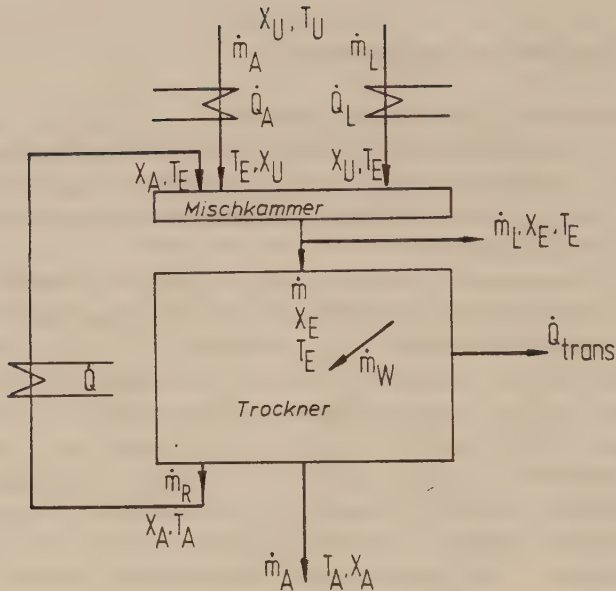


Abb. A14.1: Schematisierter Trockner mit allen auftretenden Energie- und Massenströmen

Beeinflussung des spezifischen Energiebedarfes durch die Berücksichtigung von Leckluftverlusten

Erläuterung der in Kap. 7.4 (insbesondere Abb.7.8 -7.11) dargestellten Abhängigkeiten.

1. Massenbilanzen

$$\dot{m}_L = \dot{m} \cdot \text{Leckfaktor}$$

$$\dot{m} = \dot{m}_R + \dot{m}_A$$

$$\dot{m}_{Aus} = \dot{m}_A + \dot{m}_L$$

$$\dot{m} = \dot{m}_R + \dot{m}_{Aus} - \dot{m}_L$$

2. Energiebilanzen

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L * (c_{P_L} * (T_E - T_U) + X_U * (c_{P_W} * (T_E - T_U)))$$

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A * (c_{P_L} * (T_E - T_U) + X_U * (c_{P_W} * (T_E - T_U)))$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_R * (c_{P_L} * (T_E - T_A) + X_A * (c_{P_W} * (T_E - T_A)))$$

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q} + \dot{Q}_A + \dot{Q}_L$$

$$Term1 = (c_{P_L} * (T_E - T_A) + X_A * (c_{P_W} * (T_E - T_A)))$$

$$Term2 = (c_{P_L} * (T_E - T_U) + X_U * (c_{P_W} * (T_E - T_U)))$$

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{m}_R * Term1 + \dot{m}_A * Term2 + \dot{m}_L * Term2$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ges} &= (\dot{m} - \dot{m}_{Aus} + \dot{m}_L) * Term1 + (\dot{m}_{aus} - \dot{m}_L) * Term2 + \dot{m}_L * Term2 \\ &= \dot{m} * Term1 + (\dot{m}_L - \dot{m}_{Aus}) * Term1 + \dot{m}_{Aus} * Term2 \end{aligned}$$

Annahmen:

1. $\dot{m}_{Aus} = \text{konst.}$
2. $T_E - T = \text{konst.}$ und $X_A - X_E = \text{konst.}$
für infinitesimale Änderungen von T_E

$$\dot{Q}_{spez} = f(\dot{Q}_{ges})$$

Es lassen sich zwei Extremfälle unterscheiden:

1. gesamter Luftaustausch über Leckagen ($\dot{m}_A = 0$)
 $\dot{m}_{Aus} = \dot{m}_L$
2. gesamter Luftaustausch kontrolliert ($\dot{m}_L = 0$)
 $\dot{m}_{Aus} = \dot{m}_A$

$$\text{Für Fall 1} \rightarrow \dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{m} * \text{Term1} + \dot{m}_L * \text{Term2}$$

$$\text{Für Fall 2} \rightarrow \dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{m} * \text{Term1} + \dot{m}_A * \text{Term2} - \dot{m}_A * \text{Term1}$$

Da für den Fall 1 und 2 angenommen wurde, daß $\dot{m}_{\text{Aus}} = \dot{m}_A$ bzw. $\dot{m}_L$ ist, unterscheiden sich die Ergebnisse durch den Wert $-\dot{m}_{\text{Aus}} * \text{Term1}$

Dies bedeutet, daß sich im Fall der kontrolliert ausgetauschten Luftmengen der Gesamtenergieverbrauch um diesen Term $\dot{m}_A * (c_{pL} (T_E - T_A) + X_A * c_{pW} (T_E - T_A))$ reduziert.

Überprüfung der Programme mit Meßdaten

Zur Überprüfung der Programme, nicht des Modells, wurden Kontrollrechnungen mit Meßwerten durchgeführt. Verwendung fand der in Abbildung A15.1 dargestellte Prozeß. Wie in Kapitel 7 dargestellt, ließen sich so auch Ungenauigkeiten des Modells erkennen.

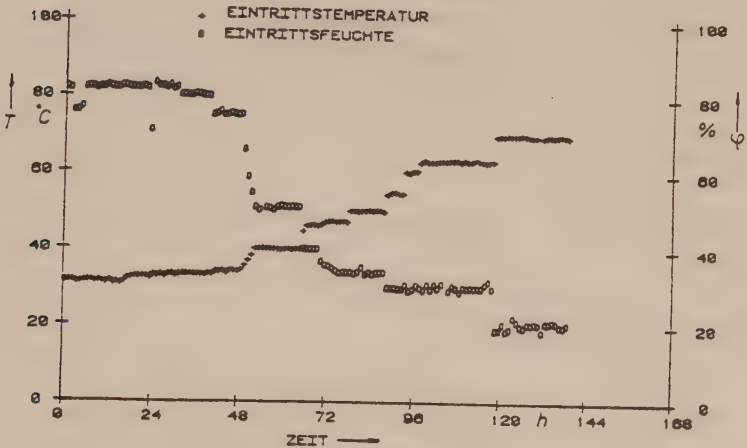


Abb. A15.1: Trocknungsprozeß, Darstellung des zeitlichen Verlaufes von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit; Meßdaten, die als Eingangsgrößen der Programmüberprüfung benutzt wurden

LEBENS LAUF

Name: Joachim Morhenne
geb: 25. 12. 1955 in Schwelm

Schul Ausbildung

1962 - 1966 Evang.Volksschule in Ennepetal-Rüggeberg
1966 - 1972 Realschule Ennepetal
1972 - 1975 Gymnasium Sedanstraße Wuppertal
Abschluß: Abitur, 10.06.1975

Bundeswehr

1975 - 1976 Grundwehrdienst in Fürstenau

Studium

1974 - 1980 diverse Industriepraktika
1976 - 1982 Studium des Maschinenbaus an der
Ruhr-Universität Bochum
Vertiefungsrichtung: Wärmetechnik
1979 - 1981 Studentische Hilfskraft am Institut
für Thermo- Fluidodynamik
Abschluß: Diplom, 28.04.1982

Berufliche Tätigkeiten

seit Mai 1982 wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Institut für Thermo- und Fluidodynamik
der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl
für Wärme- und Stoffübertragung,
Prof. Dr.-Ing. M. Fiebig

